

LILIAN ANNE KRUG

**EXTRAÇÃO DE BATIMETRIA EM ÁREAS RASAS DO COMPLEXO ESTUARINO
DE PARANAGUÁ – PR A PARTIR DE UMA IMAGEM DE SATÉLITE
LANDSAT 7 – ETM+**

Monografia apresentada para obtenção do título de Bacharel em Ciências do Mar no Curso de Graduação em Ciências do Mar, habilitação em Pesquisa Oceanográfica, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof.^o Dr. Mauricio A. Noernberg

**Pontal do Paraná
2004**

TERMO DE APROVAÇÃO

Lilian Anne Krug

“EXTRAÇÃO DE BATIMETRIA DE ÁREAS RASAS DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ, A PARTIR DE UMA IMAGEM DO SATÉLITE LANDSAT-7 ETM+”.

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências do Mar, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. Jorge Antonio S. Centeno (UFPR)



Prof. M. Sc. Carlos Roberto Soares (CEM)



Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg (CEM)
Presidente

Pontal do Paraná, 24 de setembro de 2004.



Ao mar e ao nosso futuro

(o dele e o meu, claro!)

AGRADECIMENTOS

Ao amigo, mestre, chefe e orientador Prof.^o Dr. Maurício A. Noernberg pela oportunidade, incentivo, apoio e principalmente, disposição para aturar minhas infinitas dúvidas. Muito obrigada, boss!

Aos companheiros do Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento, Joaquim P. B. Netto e Rangel Angelotti por transformar as longas horas de trabalho em momentos agradáveis, pela união, amizade e espírito de equipe. Quim, muito obrigada pela ajuda!!

Aos colegas e amigos do Grupo da Física Marinha, Prof.^o Dr. Eduardo Marone, MSc. Luiz Fernando de Carli Lautert e MSc. Clécio L. Quadros pelo suporte técnico e esclarecimentos.

Prof.^o Dr. Luis Alberto D'Afonseca pelo auxílio no cálculo.

Minha família pelo amor incondicional, em especial, meus pais Osmar e Roseli Krug, por acreditarem e viabilizarem que eu realizasse meu sonho de estudar as ciências do mar.

Aos amigos do pelotão de frente da primeira turma de Ciências do Mar, aos meninos da República Casa Amarela; À Rafaela, Verônica e Liliane pela companhia nos cafezinhos das madrugadas no CEM, Flavia, Milena, Denis, Márcia, Kalina, Paula e tantas outras figuras que descontraíram meus dias de terror e fizeram com que esses anos fossem os meus melhores.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Tudo o que acontece com a Terra, acontece
com os filhos e filhas da Terra.
O homem não tece a teia da vida;
ele é apenas um fio.
Tudo o que se faz à teia, ele faz a si mesmo”.*

*TED PERRY
(A Teia da Vida, Fritjof Capra)*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
RESUMO.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1 Sensoriamento Remoto.....	4
3.1.1 Processamento Digital de Imagens.....	4
3.1.2 O Satélite Landsat 7 – ETM +.....	5
3.1.3 Aquisição de Dados.....	6
3.1.3.1 Comportamento espectral da água.....	8
3.1.4 Extração de batimetria a partir de imagens de satélite.....	11
4 ÁREA DE ESTUDO.....	16
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6.1 Método utilizando a radiância da banda 4.....	28
6.2 Método utilizando Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI.....	31
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
GLOSSÁRIO.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
ANEXOS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Aquisição de informações por sensor orbital passivo.....	7
Figura 2	Resposta espectral do solo, vegetação e água.....	8
Figura 3	Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos..	9
Figura 4	Assinatura espectral de diferentes tipos de água.....	10
Figura 5	Diferentes origens da luz registrada por um sensor remoto acima de um corpo aquoso.....	10
Figura 6	O Complexo Estuarino de Paranaguá, Paraná	17
Figura 7	Mapa do tipo de sedimento no Complexo Estuarino de Paranaguá.....	18
Figura 8	Localização das áreas sem batimetria ou com batimetria desatualizada; a região do levantamento batimétrico da DHN em agosto de 1998 e o contorno da área utilizada como base.....	20
Figura 9	Metodologia utilizada no trabalho.....	22
Figura 10	Imagem do Complexo Estuarino de Paranaguá utilizando a radiância da banda 4.....	26
Figura 11	Comportamento de $\ln(Ld_4 - Lw_4)$ em relação às profundidades entre 0,36 m e 4,10 m.....	26
Figura 12	Imagem do Complexo Estuarino de Paranaguá utilizando o Índice de Diferença Normalizado da Água (NDWI).....	27
Figura 13	Comportamento dos valores digitais do NDWI em relação às profundidades entre 0,36 m a 4,5 m.....	27
Figura 14	Batimetria estimada para a área em frente ao Porto de Paranaguá a partir do método simples de extração de profundidades utilizando a radiância da banda 4.....	28
Figura 15	Batimetria estimada para o setor norte do Complexo Estuarino de	

	Paranaguá a partir do método simples de extração de profundidades utilizando a radiância da banda 4.....	29
Figura 16	Padrão dos erros para modelo simples de Philpot com radiâncias da banda 4 com intervalo de profundidades entre 0,36 e 4,1 m.....	30
Figura 17	Mapa das diferenças entre as profundidades reais e as profundidades estimadas pelo modelo simples de extração de batimetria.....	31
Figura 18	Batimetria estimada para a área em frente ao Porto de Paranaguá a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI.....	32
Figura 19	Batimetria estimada para o setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI.....	33
Figura 20	Padrão dos erros para modelo do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) com intervalo de profundidades entre 0,36 e 4,5 m.....	34
Figura 21	Mapa das diferenças entre as profundidades reais e as profundidades estimadas pelo Índice de Diferença Normalizada da Água.....	35
Figura 22	Parte da carta batimétrica nº 1820, correspondente a um trecho da Baía das Laranjeiras com escala 1: 80.000 com compilação de levantamentos efetuados até 1945 (adaptada pela autora para facilitar visualização) e B) Mapa batimétrico obtido através do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) para a data de 26 de setembro de 1999.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Regiões do espectro abrangidas pelos diferentes canais dos sensores TM e ETM+ dos satélites Landsat.....	6
Tabela 2	Valores de radiância mínima (L_{imin}) e radiância máxima (L_{imax}) de cada banda para imagens entre os meses de agosto e novembro de 1999.....	12
Tabela 3	Algumas correlações (r) entre os níveis de cinza e radiância e diferentes profundidades.....	24
Tabela 4	Correlações (r), equações e coeficiente de determinação (r^2) em diferentes composições de banda e ranges de profundidades nas equações de reta de tendência linear (TL) e exponencial (TE).....	27
Tabela 5	Erros médios para os métodos de Índice de Diferença Normalizada da Água e de radiância da banda 4.....	39

RESUMO

Imagens de satélites provém, a baixos custos, mapas batimétricos de áreas que são difíceis de mapear por meios hidrográficos tradicionais. No setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá o último levantamento batimétrico foi realizado na década de 50. Um mapa batimétrico dessa região, mesmo sem a acurácia das cartas náuticas será de utilidade tanto para o planejamento de estudos e modelagem ambiental, quanto para a navegação de embarcações de pequeno porte. Neste trabalho, foram correlacionados dados de uma área com profundidade conhecida com uma imagem do satélite Landsat 7 – ETM+ em diferentes bandas e razões de bandas e a diferentes intervalos de profundidade. A partir destes, foram selecionados dois métodos de extração de batimetria. O primeiro consistiu no modelo simples de banda única, onde utilizou-se o canal infra-vermelho próximo, com boa correlação para o intervalo de profundidade de 0,36 m a 4,1 m. O Índice de Diferença Normalizada da Água foi o segundo e melhor método testado obtendo alta correlação para o intervalo de 0,36 m a 4,5 m de profundidade. A aplicação deste método, de fácil execução, pode ser de grande valia para regiões onde não existam ou estejam desatualizados os dados batimétricos. Os mapas gerados são bastante fiéis para áreas rasas, considerando-se que aproximadamente 75% da área do Complexo apresentam profundidade inferior a 5 metros.

1 INTRODUÇÃO

Técnicas de modelagem, geoprocessamento e sensoriamento remoto são poderosas ferramentas de pesquisa e análise que permitem reunir um grande número de informações de maneira rápida e eficiente, sendo útil não apenas no campo científico, mas também na tomada de decisões nas questões ambientais e sociais. Com o sensoriamento remoto é possível otimizar a aquisição de dados de forma eficiente e com baixo custo. Trata-se de um processo de obtenção de informações a respeito de objetos ou fenômenos, sem entrar em contato direto com eles, usando energia eletromagnética, plataformas espaciais e processamento digital de imagens.

O aumento da capacidade de percepção humana através de utilização de faixas espectrais fora do visível, cobertura global e visão panorâmica são algumas das vantagens de sua utilização. Unido ao geoprocessamento, tornam-se um excelente método para agrupar informações levantadas por profissionais de diversas áreas do conhecimento e disponibilizá-las de maneira facilitada, auxiliando assim a interdisciplinaridade, atualmente, imprescindível para um melhor gerenciamento dos recursos naturais. A diversidade de aplicações do sensoriamento remoto (SR) em áreas costeiras é vasta, incluindo estudos qualitativos e quantitativos. Entre estas aplicações estão a determinação da batimetria e da linha de costa, estudos e mapeamentos de manguezais e de ambientes entre marés, qualidade da água, clorofila-a e transporte de sedimentos (NOERNBERG et al., 2004).

Levantamentos batimétricos são cruciais para a navegação em qualquer corpo aquoso, além de serem necessários para as modelagens hidrodinâmicas e acompanhamento de processos de erosão ou assoreamento. O método usual para obter o mapeamento batimétrico de uma região é através da utilização de ecobatímetro, aparelho que emite ondas sonoras e calcula a profundidade da coluna d'água pelo tempo de demora da resposta do sinal. O processo de aquisição de dados por ecobatímetro é longo, demorado e de alto custo uma vez que necessita de embarcação e pessoal capacitado.

Uma alternativa relativamente nova para a aquisição de batimetria de uma área é a extração desta informação a partir de imagens obtidas por sensores remotos. Os sensores podem ser aéreos (a bordo de aeronaves) ou orbitais (a bordo de satélites). Esse novo procedimento tem se mostrado bastante eficaz, especialmente quando utiliza imagens de satélites multiespectrais (LYZENGA, 1978; PHILPOT, 1989; NORDMAN et al., 1990; ABDULLAH et al., 2004; TEDESCO, 2003).

Os estuários são regiões onde ocorrem importantes processos de mistura da água continental e oceânica. Como zonas de transição entre ambientes terrestres e aquáticos, marinhos e fluviais, estão sujeitos a transformações nas mais diversas escalas de tempo e espaço. Trata-se de um dos ecossistemas mais produtivos e vulneráveis do planeta.

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) situa-se no litoral sul brasileiro e tem ampla extensão, 551,8 km² de superfície líquida, segundo NOERNBERG et al. (2004). Trata-se de um sistema ambiental de extrema importância, onde coexistem extensos manguezais preservados, atividades portuárias, concentrações urbanas, pesca artesanal e comercial, além de atividades de recreação e turismo. Favorecido pela presença do Centro de Estudos do Mar da UFPR na região de desembocadura, o CEP é alvo de estudos há mais de 20 anos em diferentes áreas da ciência, sendo esses localizados principalmente no eixo Leste - Oeste, onde se encontra a maior concentração urbana, além do porto de Paranaguá.

Apesar de diversos trabalhos realizados nos demais setores do CEP, pouco se sabe a respeito da batimetria no setor norte do mesmo. O último levantamento batimétrico realizado em apenas parte do setor norte data de março de 1958 (DHN, 2004). Um mapa batimétrico mais atualizado dessa região, mesmo sem acurácia das cartas náuticas será de utilidade tanto para o planejamento de estudos e modelagem ambiental, quanto para a navegação de embarcações de pequeno porte.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é verificar a viabilidade da ferramenta sensoriamento remoto para a obtenção de dados batimétricos de áreas rasas do Complexo Estuarino de Paranaguá, bem como suprir a ausência desse tipo de informação no setor norte. Os objetivos específicos são:

- *Comparar e relacionar as profundidades obtidas por levantamento batimétrico em uma área em frente ao porto de Paranaguá com a imagem de satélite em diferentes composições de bandas espectrais;

- *Aplicar os métodos obtidos a partir das melhores correlações, para a extração da batimetria na área em frente ao porto de Paranaguá e na região norte, na Baía das Laranjeiras;

- *Gerar mapas batimétricos a partir destes métodos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é a ciência na qual utilizam-se aparelhos receptores de energia refletida por objetos e fenômenos para a aquisição de informações sobre os mesmos sem que haja contato físico. Esses equipamentos são operados em plataformas aéreas ou espaciais de onde monitoram e mapeiam os recursos terrestres em áreas de grandes extensões. Os sensores podem ser do tipo ativo ou passivo. O sensor ativo emite sua própria energia eletromagnética, a qual irá interagir com o objeto ou fenômeno. Já um sensor passivo, utilizará a energia proveniente de outras fontes, geralmente solar, para coletar as informações desejadas, medindo a parcela refletida desta energia.

Todo objeto ou fenômeno na superfície terrestre é atingido por ondas eletromagnéticas através da radiação solar. Os sensores passivos coletam a energia eletromagnética, registram-na e a apresentam de maneira adequada à extração de informações, geralmente no formato de imagens (NOVO, 1992).

Segundo CÂMARA e MEDEIROS (1996), as características importantes de imagens de satélite são: o número e a largura de bandas do espectro eletromagnético (denominada resolução espectral), a menor área da superfície terrestre observada instantaneamente por cada sensor (resolução espacial), o nível de quantização registrado pelo sistema sensor (resolução radiométrica) e o intervalo entre duas passagens do satélite no mesmo ponto (resolução temporal).

3.1.1 Processamento Digital de Imagens

O processamento digital de imagens é o conjunto de procedimentos relativos à manipulação e análise através do computador. Sua função primordial é a de fornecer

ferramentas para facilitar a identificação e a extração de informações qualitativas e quantitativas do ambiente de modo a facilitar a interpretação das imagens de sensoriamento remoto (CROSTA, 1993).

Uma imagem é a representação de uma cena, uma projeção do espaço tridimensional em um espaço bidimensional discreto. Cada célula desta malha, denominado pixel, tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo “linha e coluna”, representados por “x” e “y”, respectivamente. Além disso, possui também uma componente “z”, sob a forma de um número discreto denominado valor digital (ou digital number DN). O valor digital de um pixel representa a intensidade de energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, para a área correspondente ao tamanho do pixel. O valor digital de um pixel corresponderá sempre à média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes na área compreendida.

3.1.2 O satélite Landsat 7 – ETM+

As imagens obtidas a partir dos satélites americanos Landsat são as mais conhecidas, acessíveis e utilizadas em nosso país (FLORENZANO, 2002). O Brasil recebe imagens Landsat desde 1973, através de uma antena de recepção do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Segundo CABRAL e VIANNA (1993), a intenção de se utilizar o sensoriamento remoto para a visualização e a caracterização de fundos marinhos resultou na criação de um sensor especializado na medida de radiâncias no azul, a faixa do espectro que tem a máxima penetração na água, o sensor de alta tecnologia Thematic Mapper (TM). A partir de 1982, com o lançamento do Landsat 4, o Thematic Mapper (TM) foi colocado em operação. Este sensor registrou dados em sete bandas espectrais, três no visível, uma no infravermelho próximo, duas no infravermelho médio e uma no infravermelho termal (Tabela 1).

Canais	Faixa / Região Espectral	Resolução (m)
1 (TM e ETM+)	0,45 – 0,52 μm (azul)	30
2 (TM e ETM+)	0,52 – 0,60 μm (verde)	30
3 (TM e ETM+)	0,63 – 0,7 μm (vermelho)	30
4 (TM e ETM+)	0,76 – 0,90 μm (IVP)	30
5 (TM e ETM+)	1,55 – 1,75 μm (IVM)	30
6 (TM)	10,42 – 12,50 μm (IVT)	120
6 (ETM+)	10,42 – 12,50 μm (IVT)	60
7 (TM e ETM+)	2,08 – 2,355 μm (IVM)	30
8 PAN (ETM+)	0,50 – 0,90 μm (VIS/IVP)	15

Tabela 1 – Regiões do espectro abrangidas pelos diferentes canais dos sensores TM e ETM+ dos satélites Landsat. (VIS = visível; IVP = infravermelho próximo; IVM = infravermelho médio; IVT = infravermelho termal.) (FLORENZANO, 2002).

O Landsat 7 foi lançado em 1999, onde o sensor TM foi substituído pelo ETM+ (Enhanced Thematic Mapper, plus). O ETM+ possui uma resolução espacial mais fina e maior fidelidade geométrica. Além das configurações básicas do TM inclui ainda, um canal pancromático (da região do visível e infravermelho próximo) com resolução espacial de 15 m e resolução espacial na banda termal de 60m (FLORENZANO, 2002). Possui uma resolução temporal de 16 dias, com horário local médio de passagem às 10h. Cada imagem obtida cobre uma área de 185 por 185 km. Sua órbita é circular, quase polar e síncrona com o Sol.

NOVO (1992) divide o sistema de obtenção de informação por sensoriamento remoto em dois processos: A aquisição de dados e a análise dos dados.

3.1.3 Aquisição de dados

A aquisição de dados por sensoriamento remoto passivo dá-se da seguinte maneira: i) a energia proveniente da fonte viaja pela atmosfera até atingir o objeto, ii) ao interagir com o objeto parte da energia será refletida para a atmosfera e captada pelo sensor, iii) o sensor

mede e registra os sinais enviando-os em seguida para a estação de recepção, que codifica tais sinais de maneira legível, como o formato de imagem (Figura 1).

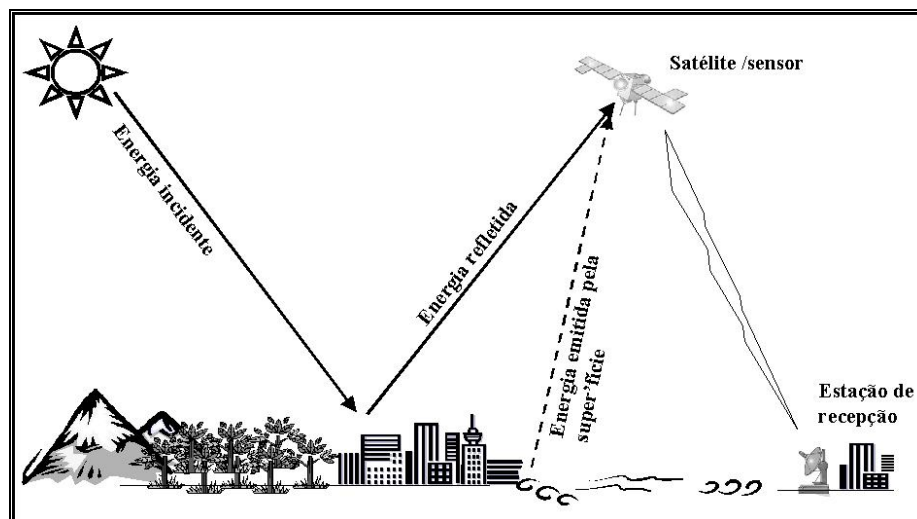


Figura 1 – Aquisição de informações por sensor orbital passivo (adaptado de FLORENZANO, 2002).

Um dos fatores mais críticos na recepção e na análise da imagem é o efeito da atmosfera na propagação da energia. A radiação que cruza a atmosfera, no caminho fonte-alvo e alvo-sensor, sofre processos de absorção, onde as partículas dos gases atmosféricos absorvem determinados comprimentos de onda, e processos de espalhamento, onde ocorre desvio dos raios devido às partículas presentes no ar, resultando, assim, em uma mudança de direção e distribuição espectral da energia no fluxo. Os impactos causados por estes efeitos atmosféricos devem ser eliminados ou atenuados para que os dados sejam analisados corretamente.

A interação da energia eletromagnética com o alvo é chamada de resposta espectral e depende do comprimento de onda selecionado, do ângulo de observação e da mistura do alvo com outras substâncias. Os objetos da superfície terrestre como a vegetação, a água e o solo refletem, absorvem e transmitem a radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características bio-físico-químicas (FLORENZANO, 2002). Tal comportamento é representado através das chamadas

curvas espectrais de alvos (Figura 2). São essas variações que tornam possível distinguir os objetos da superfície terrestre nas imagens de sensores remotos.

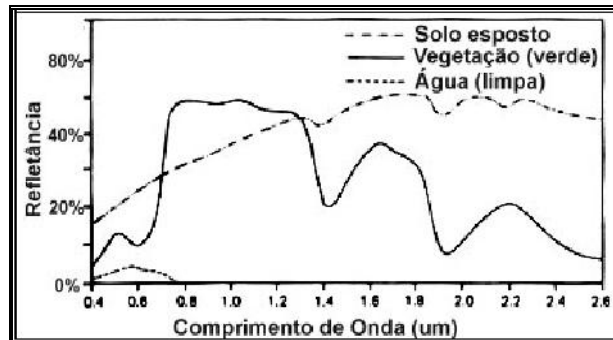


Figura 2 – Resposta espectral do solo, vegetação e água (¹LILLESAND E KIEFER, 1994 apud TEDESCO, 2003)

3.1.3.1 Comportamento Espectral da Água

A maior parte da superfície do planeta é coberta por água, sendo este o principal elemento observável no Sensoriamento Remoto, podendo estar na forma líquida, sólida ou, ainda, como conteúdo hídrico da vegetação ou dos solos, e até mesmo vapor, na forma de nuvens, que freqüentemente se interpõem entre o sensor e o alvo (SANDIDGE e HOLYER, 1998). Como pode ser visto na figura 3, o comportamento espectral da água varia de acordo com seu estado físico: água propriamente dita (estado líquido), água em forma de nuvens (vapor) e água em forma de neve (sólido).

¹ LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 3ª edição. New York, 1994.

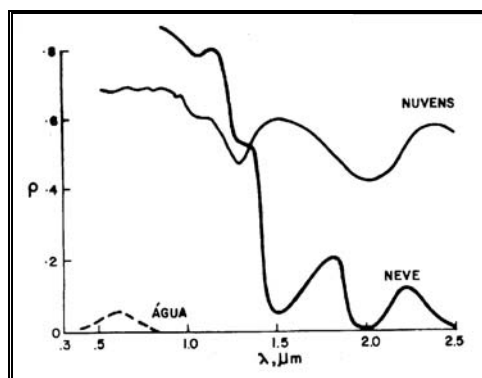


Figura 3 – Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos (²BOWKER *et al* apud NOVO, 1992), onde ρ é a reflectância e λ é o comprimento de onda (em μm).

Os corpos aquosos se comportam como meios de razoável transparência às radiações eletromagnéticas de comprimento entre 0.38 e 0.7 μm (espectro visível), sendo praticamente nula na faixa do infravermelho, pois nessa faixa de comprimento de onda a radiação é quase que totalmente absorvida pela coluna d'água.

No estudo de corpos d'água, além de sofrer alterações devido à atmosfera, o raio de energia será alterado também por fatores como condições da superfície da água, ângulo de incidência da radiação, mudança de direção do feixe devido à mudança de meio, absorção e espalhamento devido ao choque com partículas suspensas ou dissolvidas na água (TEDESCO, 2003).

A cor da água e o poder de penetração da luz (denominado coeficiente de atenuação) na coluna d'água são algumas características da massa d'água que estão intimamente ligadas à quantidade e características do material particulado em suspensão e dissolvido (MARTINS, 1994). O comportamento espectral de porções de água altera-se dependendo da concentração de material em suspensão presente nas mesmas (Figura 4).

² BOWKER, D. E.; DAVIS, R. E.; MYRICK, D. L.; STACY K.; JONES, W. T. Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies. Hampton - **NASA Reference Publication 1139** 1985.

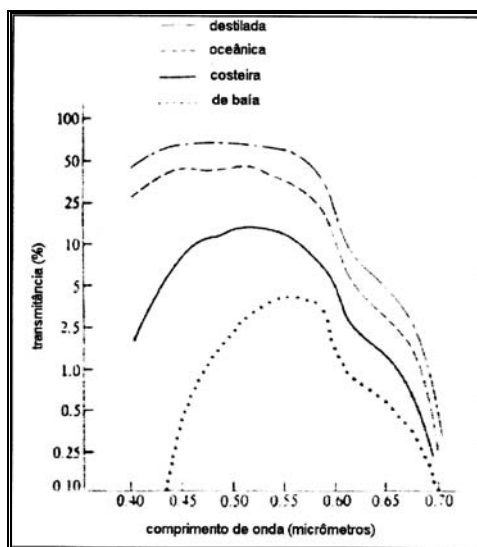


Figura 4 – Assinatura espectral de diferentes tipos de água (³SWAIN & DAVIS, 1978 apud TEDESCO, 2003).

Os sensores podem registrar a radiação eletromagnética originada pelo espalhamento da sub-superfície, pela reflexão da luz difusa pela superfície (reflexão dos raios recebidos pelo espalhamento na atmosfera), pela reflexão direta do fluxo solar pela superfície e pelo espalhamento dentro da atmosfera (Figura 5).

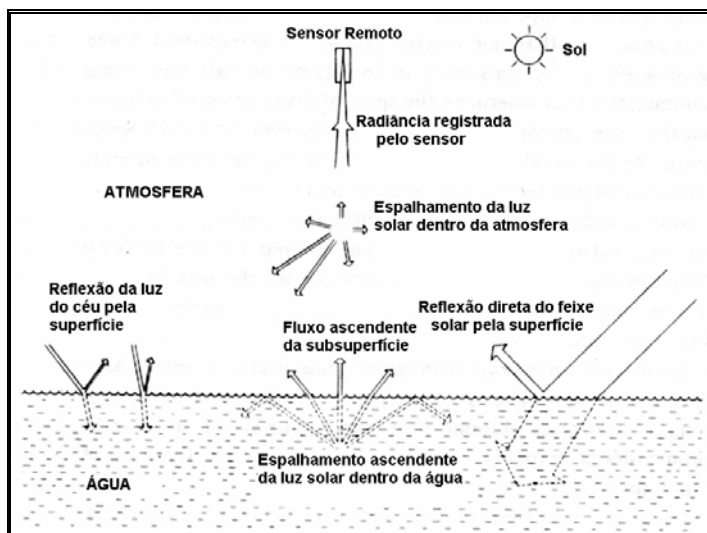


Figura 5 – Diferentes origens da luz registrada por um sensor remoto acima de um corpo aquoso (Adaptado de KIRK, 1994).

³ SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote Sensing: The Quantitative Approach**. Ed. McGraw-Hill Book Company. 1978.

Todos esses fatores afetam a resposta espectral que o sensor recebe. Na análise, deve-se sempre que possível eliminar esses efeitos ao máximo, pois assim estará aumentando a acurácia dos dados.

3.1.4 Extração de batimetria a partir de imagens de satélite

Segundo BABAN (1997), diversos estudos vêm demonstrando, com vários graus de sucesso, a capacidade preditiva da imagem de satélite no mapeamento de propriedades da água. Imagens de satélites provém, a baixos custos, mapas batimétricos de áreas que são difíceis de mapear por meios hidrográficos tradicionais devido ao seu tamanho ou seu complicado relevo submerso.

Em geral, o uso de dados de imagem Landsat como fonte de mapeamento batimétrico tem várias vantagens. As imagens dos satélites Landsat fornecem uma cobertura bidimensional contínua melhor que as séries de pontos de profundidade que são geralmente obtidas por medições feitas a bordo de barcos. A repetição da cobertura pode ser feita a cada 16 dias, permitindo a separação de feições permanentes de outras não permanentes, tais quais qualidade da água e variações atmosféricas. A repetitividade da cobertura também permite atualizações de profundidades em regiões arenosas, as quais podem mudar por processos de erosão e deposição ao longo do tempo ou após seguidas tempestades (NORDMAN et al., 1990).

Depois de tratada de efeitos da atmosfera e de maré, as células, ou pixels, da imagem contêm informações a respeito do tipo de fundo (para regiões óticamente rasas, ou seja, locais onde a radiância passa por toda a coluna d'água e atinge o fundo), tipo de água e profundidade da coluna d'água.

A maior parte dos métodos encontrados na literatura para a extração de profundidade dessas células trabalha com valores de radiâncias recebidos pelo sensor. Para

transformar o valor digital (DN) do pixel em valores de radiâncias utiliza-se a equação (ACCIOLY et al., 2002):

$$L_{di} = L_{imin} + [(L_{imax} - L_{imin}) / 255] * DN \quad (1)$$

onde L_{di} é a radiância observada pelo sensor na banda i ; L_{imin} , a radiância mínima recebida pelo sensor, e L_{imax} , a radiância máxima observada pelo sensor, estimadas de acordo com a área de estudo para cada banda para imagens Landsat 7 – ETM+. Estes valores estão disponíveis no manual do usuário (NASA, 2004), listados na tabela 2.

Banda	1	2	3	4	5	7
Intervalo espectral(μm)	0,45-0,52	0,52-0,60	0,63-0,69	0,76-0,90	1,55-1,75	2,08-2,35
$L_{imin}(Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$	-6,2	-6,4	-5,0	-5,1	-1,0	-0,35
$L_{imax}(Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$	191,6	196,5	152,9	157,4	31,06	10,80

Tabela 2 – Valores de radiância mínima (L_{imin}) e radiância máxima (L_{imax}) de cada banda para imagens entre os meses de agosto e novembro de 1999 (NASA, 2004).

O modelo mais simples de extração de profundidade trabalha com transferência de radiâncias, segundo PHILPOT (1989), de forma geral:

$$L_d = L_b \exp(-gz) + L_w \quad (2)$$

onde L_d é a radiância observada pelo sensor; g o coeficiente de atenuação efetiva da água; z a profundidade da coluna d'água; L_b é a reflectância do fundo e L_w a radiância observada sobre água óticamente profunda.

Ao utilizar este modelo, assume-se que as propriedades óticas da água são verticalmente homogêneas, bem como, consideram-se constantes sobre a cena a iluminação, a transmissão atmosférica, o trajeto da radiância, o estado do mar, a reflectância da água, a reflectância do fundo e a atenuação efetiva da água. Assim, presumindo-se que

os parâmetros L_b , L_w e g são constantes sobre a cena, e sabendo que os valores de L_d para uma ou mais profundidades conhecidas, pode-se encontrar os valores de L_b e g . Sempre que L_w é tomado como constante, o procedimento usual é linearizar a equação (2), definindo, desta forma, uma nova variável (X), a qual varia linearmente com a profundidade:

$$X = \ln(L_d - L_w) = \ln(L_b) - gz. \quad (3)$$

Isolando z , tem-se a seguinte equação:

$$z = -1/g * \ln(L_d - L_w) + 1/g * \ln L_b \quad (4)$$

PHILPOT (1989) explora as implicações causadas pela suposição de invariância horizontal do modelo simples. O autor recomenda o uso de imagens multiespectrais para mapeamento batimétrico quantitativo e explorado os problemas que se encontra quando as condições estão abaixo das ideais. A partir do modelo simples, derivam-se equações para três exemplos, onde no primeiro a única variável considerada é a profundidade, o segundo tem como variável também o tipo de fundo e o terceiro caso cita o tipo de água como uma outra variável na cena.

Ao elaborar um pouco mais o modelo acima descrito, LYZENGA (1978) acrescenta à equação os seguintes parâmetros:

$$L_d = L_w + k_i L_b \cdot \exp(-g f z) \quad (5)$$

onde k_i é uma constante que inclui a irradiância solar, a transmitância da atmosfera e da superfície da água, e a redução da radiância devido à refração na superfície da água e f é um fator geométrico para considerar o trajeto do feixe através da água.

LYZENGA (1978) ainda sugere que uma extensão deste método é calcular a profundidade a partir de duas ou mais bandas e fazer a média dos resultados. NORDMAN et

al. (1990) utilizam a generalização do método de duas bandas, chamado de método de múltiplas bandas, para extrair as profundidades usando N bandas por

$$z = a_0 + a_1 x n_1 + a_2 x n_2 + \dots + a_N x n_N \quad (6)$$

onde $x n_i = \ln(L_{di} - L_{wi})$.

Para aplicar esse método, devem-se conhecer as profundidades de alguns pontos da cena. Essas profundidades tornam-se as variáveis dependentes e seus respectivos $x n_i$ as variáveis independentes de uma equação de regressão. A análise de regressão é realizada para determinar os coeficientes a_0, a_1, \dots, a_N .

A escala de profundidade possível de ser medida é limitada para uma dada banda porque a profundidade de penetração é proporcional ao seu coeficiente de atenuação. Assim, uma vez que diferentes bandas penetram em diferentes profundidades na água, métodos de canais múltiplos de extração de profundidade são bem sucedidos (NORDMAN et al., 1990).

Para TEDESCO (2003) os modelos propostos pela literatura, como os descritos acima, envolvem diversas incógnitas difíceis de serem determinadas. A autora sugere o emprego da regressão linear entre profundidades e o logaritmo natural dos níveis de cinza de uma imagem IKONOS para os valores a_0 e a_1 de seu modelo,

$$z = a_0 + a_1 \cdot \ln NC \quad (7)$$

sendo a_0 o ponto de interceptação da reta no eixo y e a_1 o coeficiente de inclinação da mesma.

Um outro método desenvolvido para delinear feições na água e realçá-las em uma imagem de satélite multiespectral é o Índice de Diferença Normalizada da Água (Normalized Difference Water Index – NDWI). O NDWI faz uso do sinal refletido nas regiões do infra-

vermelho próximo e do verde visível para realçar a presença de tais feições enquanto elimina a influência do solo e vegetação terrestre (McFEETERS, 1996). O índice é calculado por:

$$(DN_2 - DN_4) / (DN_2 + DN_4), \quad (8)$$

onde DN_2 é o valor digital do pixel na banda 2, correspondente da faixa verde do espectro visível e DN_4 , valor digital na banda 4, região do infra-vermelho próximo.

De acordo com McFEETERS (1996), a seleção destas bandas tem a intenção de: (1) maximizar a reflectância típica de feições na água nos comprimentos de onda relativos ao canal verde; (2) minimizar a baixa reflectância no infra-vermelho próximo de feições na água; e (3) utilizar a alta reflectância no infra-vermelho próximo por feições de vegetação terrestre e solo.

4 **ÁREA DE ESTUDO**

Localizado no litoral do Paraná, sul do Brasil, o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) - 25° 30' latitude Sul, 48° 30' longitude Oeste - é limitado pelo Oceano Atlântico e pelas escarpas da Serra do Mar. Estuário de planície costeira, comunica-se com o oceano por três canais e possui características típicas de um ambiente de regressão marinha. Possui 551,8 km² de superfície líquida e 136 km² de área de baixios (NOERNBERG et al., 2004).

Considerando as quatro cidades (Antonina, Guaraqueçaba, Paranaguá e Pontal do Paraná), a população é de aproximadamente 170.000 pessoas (IBGE, 2004). A cobertura vegetal integra uma das áreas mais preservadas da Mata Atlântica brasileira e as bacias de drenagem litorânea possuem um elevado poder erosivo, decorrente da alta instabilidade natural dessas regiões de serras e morros (NOERNBERG, 2001).

O Complexo Estuarino de Paranaguá tem dois eixos principais, um no sentido N-S e outro L-O que se comunicam somente na chamada zona de mistura. NOERNBERG et al. (2004) classificam o Complexo Estuarino de Paranaguá em três níveis hierárquicos: O complexo propriamente dito é o nível principal; já o segundo nível é composto pelas baías (Paranaguá, Antonina, Laranjeiras e Pinheiros) e a zona de mistura. O último nível hierárquico trata-se dos sub-estuários (Antonina, Cachoeira, Cotinga, Itaquí, Benito e Guaraqueçaba) definidos através das suas características morfológicas tais como embaçamento e área de drenagem específica (figura 6).

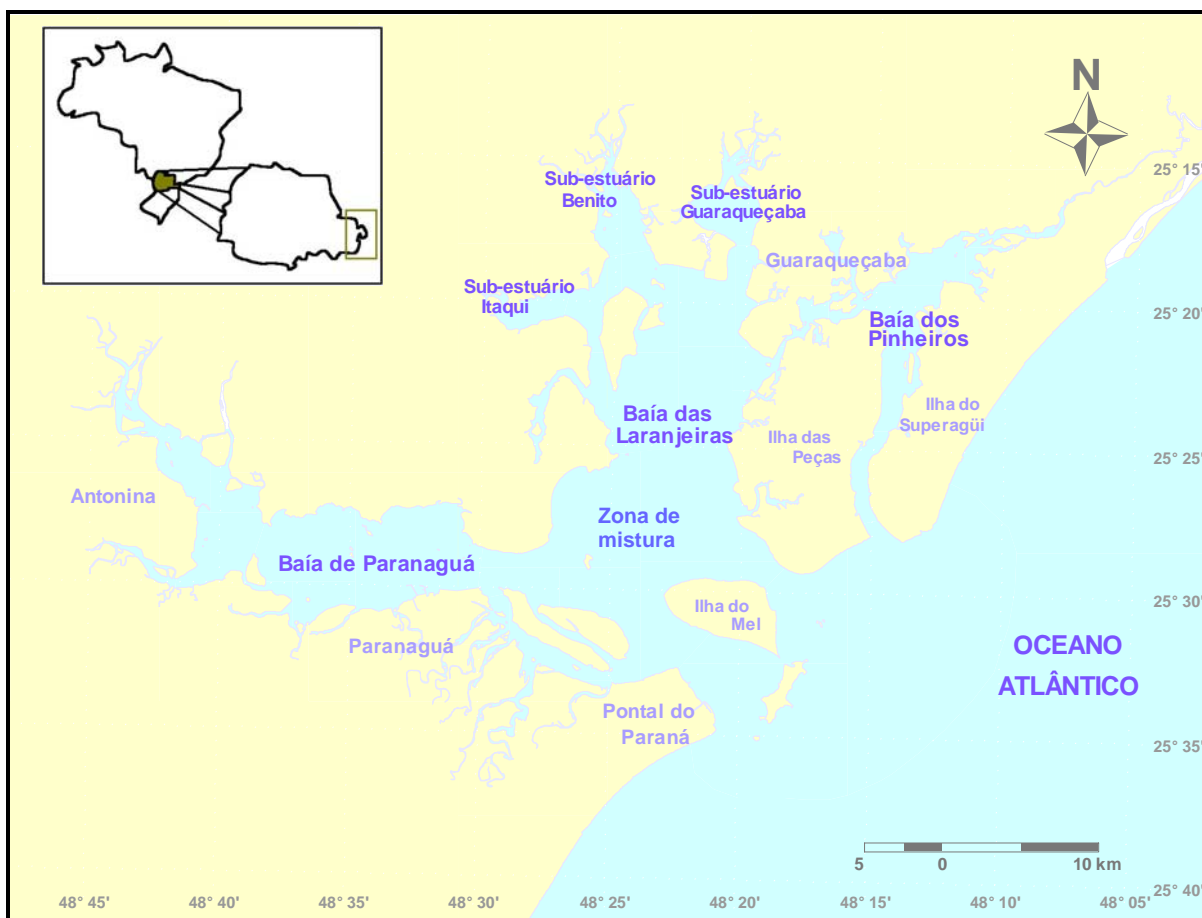


Figura 6 – O Complexo Estuarino de Paranaguá, Paraná.

Os sedimentos do fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá são argilosos à montante tornando-se arenosos à medida que se aproximam da desembocadura. A presença de matéria orgânica no sedimento também decresce sentido jusante (SOARES, 1990) (Figura 7). Na região de encontro dos dois eixos principais do CEP ocorrem feições deposicionais arenosas, submersas e semi-submersas, chamadas genericamente de baixios, interpretadas como deltas de maré e feições assemelhadas (ANGULO, 1995). 75% da área do CEP apresentam profundidade inferior a 5 m (NOERNBERG, 2001).

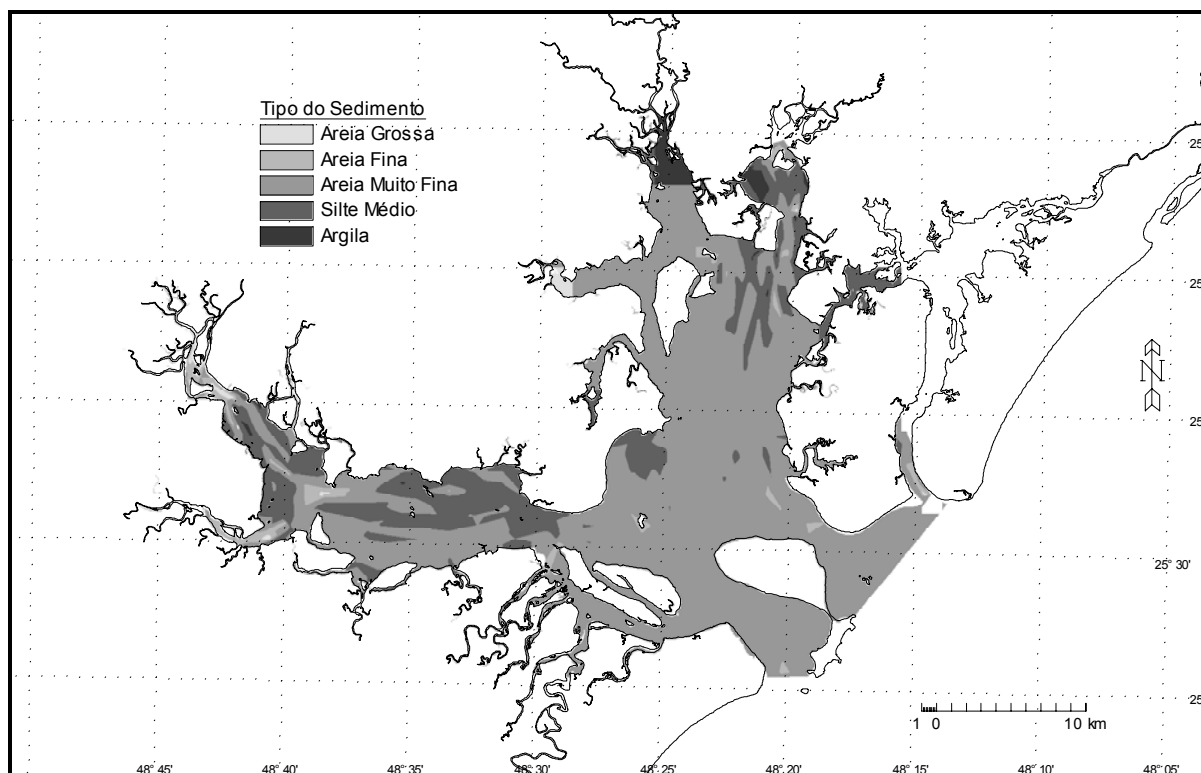


Figura 7 – Mapa do tipo de sedimento no Complexo Estuarino de Paranaguá. (SOARES, 1990 e PETROBRAS⁴, 1996/1997 trabalhado por NOERNBERG, 2001)

O clima da região depende do deslocamento do anti-ciclone do Atlântico Sul e da passagem de massas polares no inverno. Na classificação de Köppen é do tipo Cfa, clima pluvial temperado (C); sempre úmido e com chuvas todos os meses (f); e com temperatura média do mês mais quente acima de 22° C (a). As médias anuais de temperaturas máxima e mínima e umidade relativa do ar são de 29°C, 18°C e 85%, respectivamente (GFM, 2004). Caracterizado como período mais chuvoso, o verão é responsável pela maior parte dos 1988 mm de pluviosidade média anual chegando a ocorrer excedente hídrico, intensificando, assim, o aporte de água doce no estuário pelas bacias hidrográficas de Antonina e Paranaguá e o potencial de erosão pela chuva, que é oito vezes superior ao do inverno. Já no inverno ocorre deficiência hídrica, visto que neste período a evaporação é, em média, sete vezes superior à precipitação (MANTOVANELLI, 1999). Os ventos predominantes são de Leste e Sudeste e a média anual de décimos de céu encoberto é de 7/10 (GFM, 2004).

⁴ PETROBRAS. **Projeto de Estudos Ambientais em Áreas Costeiras e Oceânicas no Sul do Brasil**. Relatório Final. 1996/1997. 9 pp.

De grande importância sócio-econômica e ambiental, no CEP situam-se a APA de Guaraqueçaba, o Parque Nacional de Superagui, a Estação Ecológica da Ilha do Mel, as cidades de Guaraqueçaba, Morretes, Antonina e Paranaguá com seu porto, o maior exportador de grãos da América Latina. Localizado na desembocadura do Complexo, no município de Pontal do Paraná, o Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná desenvolve a maior parte de suas pesquisas no interior do CEP nas áreas biológica, física, química e geológica. O eixo L - O, compreendido pelas baías de Paranaguá e Antonina, bem como por parte da zona de mistura é o trecho mais estudado do Complexo devido à importância da manutenção da navegabilidade para acesso aos portos de Paranaguá e Antonina.

O sensoriamento remoto vem sendo utilizado em trabalhos para a descrição de processos dinâmicos da região. Como exemplo, pode-se citar MARTINS et al. (1993) e MARTINS (1994), que utilizaram o sensoriamento remoto para o estudo da variação espacial e temporal da linha de costa e análise de sólidos em suspensão e parâmetros hidrográficos na massa d'água superficial; NOERNBERG (2001), que identifica e descreve os processos morfodinâmicos relacionados ao transporte de sedimentos e vinculados às variações das condições ambientais da zona costeira, a partir do processamento de imagens Landsat; MARONE e NOERNBERG (2000), os quais observaram uma frente estuarina a partir de imagem de radar e NOERNBERG et al. (2004) que utilizam uma imagem Landsat 7 para descrições de parâmetros físicos do Complexo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Em agosto de 1998, a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) realizou um levantamento hidrográfico por ecobatímetro que cobriu o setor em frente ao porto de Paranaguá, com 10.345 pontos amostrais no total. A partir desses dados foram utilizadas as informações da área mais rasa desse setor (média de 5 m de profundidade) para servir de base à comparação com os dados extraídos da imagem (Figura 8).

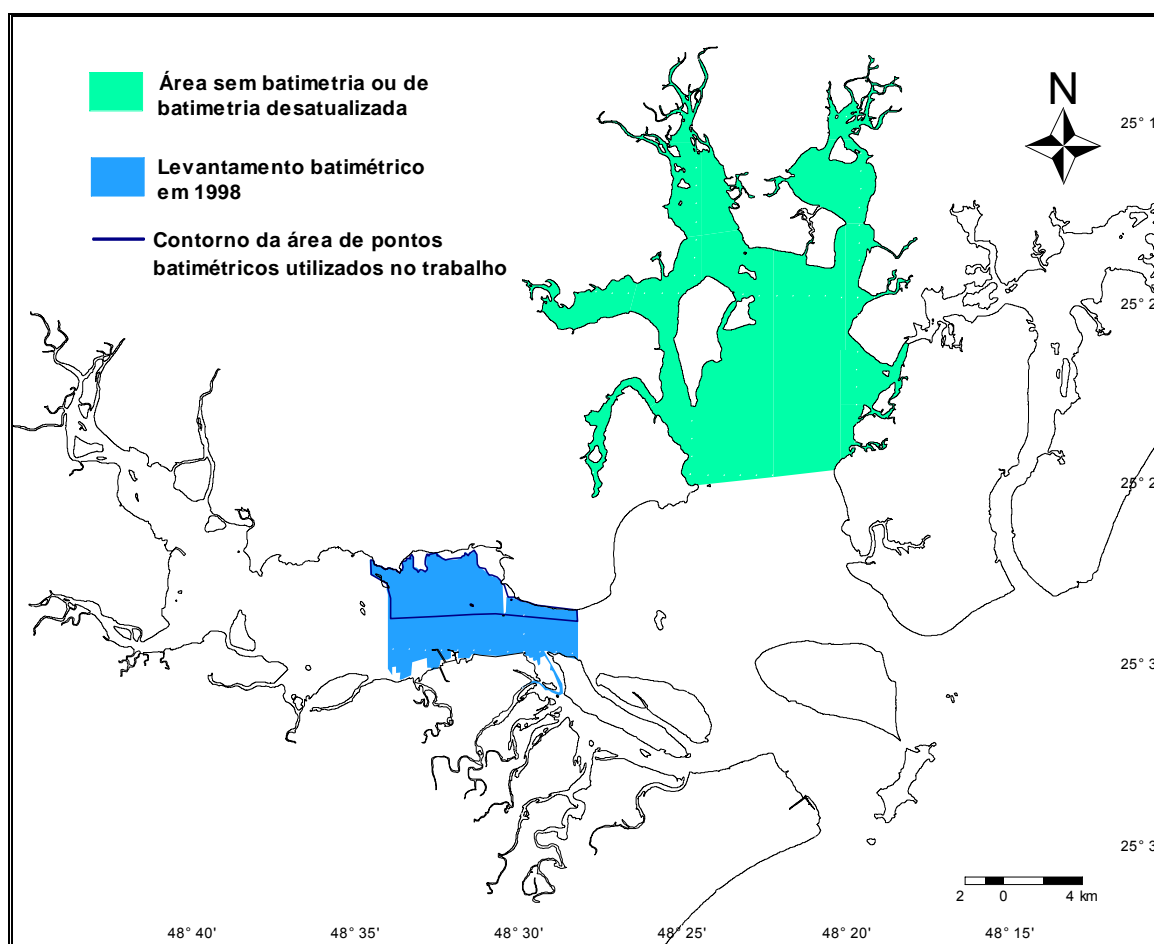


Figura 8 – Localização das áreas sem batimetria ou com batimetria desatualizada; a região do levantamento batimétrico da DHN em agosto de 1998 e o contorno da área utilizada como base para o presente trabalho.

A metodologia foi dividida em diversas etapas (Figura 9). O primeiro passo foi à correção do efeito da maré em relação à batimetria realizada pela DHN. Isto porque, as

profundidades obtidas em levantamentos hidrográficos incluem a variação da maré no instante da medição. Esta variação da maré muda de local para local, de acordo com as condições locais. Foi adotado um plano de referência, denominado nível de redução, em relação ao qual todas as profundidades obtidas são referidas a uma maré mínima de sizígia, para eliminar os efeitos da maré. Com isto, garante-se a embarcação não encontrar profundidades menores que as representadas nas cartas náuticas, devendo encontrar profundidades maiores devido à maré no instante em que se encontra.

Este levantamento batimétrico foi referenciado à situação da maré no momento da aquisição da imagem de satélite. Para obter a profundidade dos pontos na hora da passagem do satélite, em 26 de setembro de 1999, foram utilizadas as seguintes equações:

$$Z_{26\text{set}1999} = Z_{\text{maré}0} + \text{maré}_{26\text{set}1999} \quad (9)$$

sendo $Z_{26\text{set}1999}$ a profundidade do local na hora da passagem do satélite em 26 de setembro de 1999; $\text{maré}_{26\text{set}1999}$ é a altura da maré na hora da passagem do satélite e

$$Z_{\text{maré}0} = Z_{\text{ecobatímetro}} - \text{NR} - \text{maré}_{\text{mín}} \quad (10)$$

onde $Z_{\text{ecobatímetro}}$ é a profundidade obtida com o ecobatímetro em agosto de 1998; NR é o nível de redução (fornecido pela DHN) e $\text{maré}_{\text{mín}}$ é a menor maré registrada no local.

Após obter as profundidades na hora exata da aquisição da imagem, a partir dos pontos da área mais rasa em frente ao porto de Paranaguá (Figura 7) foi construído um modelo digital do terreno (MDT), com malha de 30 m x 30 m, semelhante a resolução espacial do Landsat (30 m x 30 m), para posterior relacionamento com os níveis de cinza da imagem.

Antes de trabalhar com os NC foi necessário eliminar os efeitos da atmosfera na imagem de satélite. Para isso, utilizou-se o método de regressão de bandas, o qual utiliza o termo independente da equação da reta, obtido a partir da regressão linear da banda 4 com

as bandas 1, 2 e 3, como o valor a ser subtraído de cada banda, o qual corresponde ao efeito da atmosfera (⁵MATHER apud NOERNBERG, 2001).

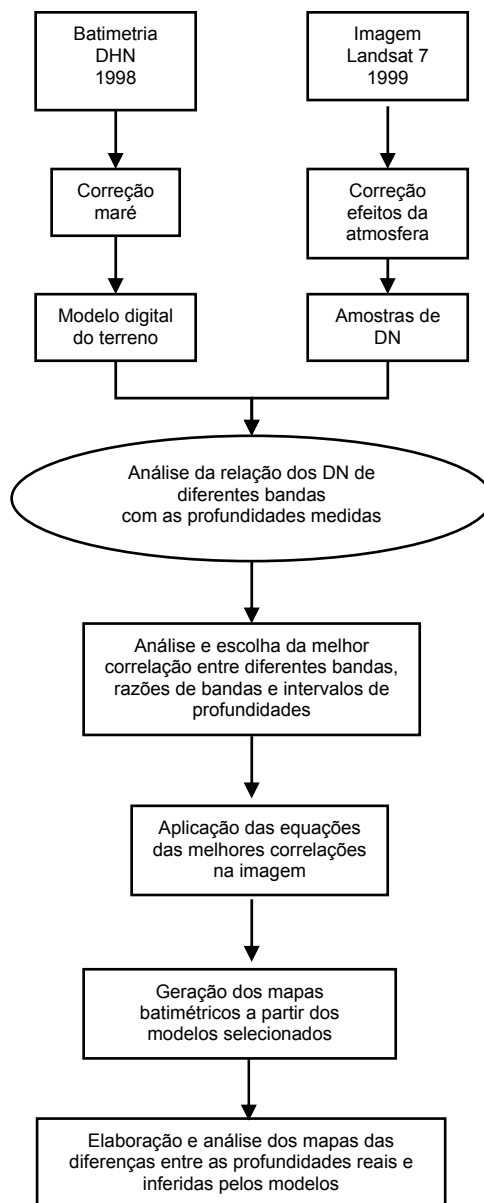


Figura 9 – Metodologia utilizada no trabalho.

A imagem foi cruzada com os pontos batimétricos no software SPANS, e os valores digitais nas cinco bandas, respectivos a cada ponto de profundidade conhecida, foram listados. Como foram encontrados vários pontos com profundidades iguais, mas com

⁵ MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-sensed Images: an Introduction**. New York: Wiley. 1987. 352 pp.

valores digitais diferentes, sendo que em alguns a diferença entre as respostas era bastante grande, optou-se por calcular a média e o desvio padrão dos valores digitais encontrados para pontos com profundidade iguais. Os valores que ultrapassaram a média mais o desvio padrão ou menores que a média menos o desvio padrão foram desconsiderados para evitar a introdução de observações errôneas.

Foram feitas correlações entre as profundidades em diferentes intervalos e os valores digitais das bandas 1, 2, 3, 4 e 5, valores digitais resultantes de algumas divisões de bandas, do Índice de Diferença Normalizada da Água e também com as profundidades e as radiâncias das bandas 2, 3 e 4, utilizando o $\ln(L_{di} - L_{wi})$ (ver Eq. (3)). Os intervalos de profundidade foram selecionados na medida que aumentasse a correlação entre as profundidades e os valores digitais. Foram testados intervalos que continham limites mínimos de 0,36 m, 0,50 m e 0,80 m e limites máximos de 3,9 m, 4,1 m, 4,5 m, 5 m, 6 m, 8 m, 10 m, 15 m e 28,8 m.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após obter os valores digitais para todas as bandas da imagem Landsat 7 – ETM+ referentes aos pontos com profundidade conhecida na área rasa em frente ao porto de Paranaguá, os dados foram correlacionados a diferentes intervalos de profundidades, para que pudessem ser verificadas em quais bandas e em quais destes intervalos ocorrem correlações mais altas.

Foram considerados bons os valores de correlação acima de 0,700, levando em conta ainda os coeficientes de determinação (R^2), que mostram o quanto as variáveis dependentes, ou seja, os valores digitais ou de radiância podem ser explicados pelas tendências de regressão tanto linear quanto exponencial. Alguns coeficientes de correlação de Pearson (r) em diferentes ranges de profundidade estão listados na tabela 3.

banda 3	r	Banda 4	r	b2/b4	r
0,36 m - 4,1 m	-0,755	0,36 m - 4,1 m	-0,808	0,36 m - 4,1 m	0,863
0,36 m - 4,5 m	-0,735	0,36 m - 4,5 m	-0,795	0,36 m - 4,5 m	0,844
0,36 m - 6 m	-0,531	0,36 m - 6 m	-0,710	0,36 m - 6 m	0,718
0,36 m - 8 m	-0,488	0,36 m - 8 m	-0,637	0,36 m - 8 m	0,600
0,5 m - 4,1 m	-0,748	0,5 m - 4,1 m	-0,797	0,5 m - 4,1 m	0,856
0,5 m - 4,5 m	-0,726	0,5 m - 4,5 m	-0,784	0,5 m - 4,5 m	0,836
0,5 m - 6 m	-0,508	0,5 m - 6 m	-0,695	0,5 m - 6 m	0,704
0,5 m - 8 m	-0,465	0,5 m - 8 m	-0,621	0,5 m - 8 m	0,583
0,8 m - 4,1 m	-0,696	0,8 m - 4,1 m	-0,751	0,8 m - 4,1 m	0,821
0,8 m - 4,5 m	-0,669	0,8 m - 4,5 m	-0,736	0,8 m - 4,5 m	0,796
0,8 m - 6 m	-0,403	0,8 m - 6 m	-0,634	0,8 m - 6 m	0,642
0,8 m - 8 m	-0,369	0,8 m - 8 m	-0,553	0,8 m - 8 m	0,507
B3/b4	r	NDWI	r	$\ln(L_{d4}-L_{w4})^1$	r
0,36 m - 4,10 m	0,845	0,36 m - 4,1 m	0,826	0,36 m - 4,1 m	-0,864
0,36 m - 4,50 m	0,824	0,36 m - 4,5 m	0,814	0,36 m - 4,5 m	-0,854
0,36 m - 6 m	0,717	0,36 m - 6 m	0,725	0,36 m - 6 m	0,754
0,36 m - 8 m	0,599	0,36 m - 8 m	0,632	0,36 m - 8 m	0,664
0,5 m - 4,1 m	0,836	0,5 m - 4,1 m	0,815	0,5 m - 4,1 m	-0,851
0,5 m - 4,5 m	0,814	0,5 m - 4,5 m	0,802	0,5 m - 4,5 m	-0,841
0,5 m - 6 m	0,703	0,5 m - 6 m	0,711	0,5 m - 6 m	0,741
0,5 m - 8 m	0,581	0,5 m - 8 m	0,616	0,5 m - 8 m	0,648
0,8 m - 4,1 m	0,796	0,8 m - 4,1 m	0,765	0,8 m - 4,1 m	-0,811
0,8 m - 4,5 m	0,770	0,8 m - 4,5 m	0,752	0,8 m - 4,5 m	-0,799
0,8 m - 6 m	0,641	0,8 m - 6 m	0,649	0,8 m - 6 m	0,698
0,8 m - 8 m	0,506	0,8 m - 8 m	0,543	0,8 m - 8 m	0,599

Tabela 3 – Algumas correlações (r) entre os valores digitais e radiância e diferentes profundidades. ¹ L_{d4} é a radiância observada no pixel pelo sensor na banda 4 e L_{w4} é a radiância observada em pixels de água profunda no canal do infra-vermelho próximo.

Foram selecionados, de acordo com melhores correlações e profundidades mais abrangentes, os intervalos entre 0,36 m a 4,1 m e a 4,5 m. Os modelos foram avaliados apenas dentro desses limites de profundidade. Na tabela 4 estão as equações das retas, lineares e exponenciais, com seus respectivos coeficientes de determinação (r^2) para estes intervalos em diferentes composições de bandas.

banda 3	r	Equação da reta (TL)	R²	Equação da reta (TE)	r²
0,36-4,1	-0,755	$z = -0,194 * DN_3 + 7,606$	0,571	$z = 36,385 * \exp(-0,108 * DN_3)$	0,647
0,36-4,5	-0,735	$z = -0,217 * DN_3 + 8,405$	0,540	$z = 46,01 * \exp(-0,114 * DN_3)$	0,638
banda 4					
0,36-4,1	-0,808	$z = -0,105 * DN_4 + 3,777$	0,653	$z = 4,266 * \exp(-0,057 * DN_4)$	0,732
0,36-4,5	-0,795	$z = -0,118 * DN_4 + 4,130$	0,633	$z = 4,737 * \exp(-0,062 * DN_4)$	0,734
b2/b4					
0,36-4,1	0,863	$z = 0,878 * (DN_2/DN_4) + 0,281$	0,744	$z = 0,675 * \exp(0,457 * (DN_2/DN_4))$	0,743
0,36-4,5	0,844	$z = 0,967 * (DN_2/DN_4) + 0,221$	0,712	$z = 0,669 * \exp(0,478 * (DN_2/DN_4))$	0,744
b3/b4					
0,36-4,1	0,845	$z = 0,762 * (DN_3/DN_4) + 0,073$	0,713	$z = 0,601 * \exp(0,399 * (DN_3/DN_4))$	0,726
0,36-4,5	0,824	$z = 0,846 * (DN_3/DN_4) - 0,013$	0,679	$z = 0,591 * \exp(0,421 * (DN_3/DN_4))$	0,725
NDWI					
0,36-4,1	0,826	$z = 3,635 * NDWI^1 + 1,219$	0,682	$z = 1,071 * \exp(1,962 * NDWI^1)$	0,741
0,36-4,5	0,814	$z = 4,09 * NDWI^1 + 1,236$	0,662	$z = 1,078 * \exp(2,09 * NDWI^1)$	0,746
Ld4 Utilizando equação (4)					
0,36-4,1	-0,864	$z = ((-1/-0,847) * \ln(Ld_4 - (-2,91))) + ((1/-0,847) * \ln(23,798))$			0,746
0,36-4,5	-0,854	$z = ((-1/-0,748) * \ln(Ld_4 - (-2,91))) + ((1/-0,748) * \ln(20,202))$			0,729

Tabela 4 – Correlações (r), equações e coeficiente de determinação (r^2) em diferentes composições de banda e ranges de profundidades nas equações de reta de tendência linear (TL) e exponencial (TE). ¹ NDWI = $(DN_2 - DN_4) / (DN_2 + DN_4)$

Optou-se por testar um modelo que utilizasse uma relação linear e outro com variação exponencial. Foram selecionados dois modelos: o modelo simples baseado na radiância da banda 4, Ld_4 (Figura 10), utilizando profundidades de 0,36 m até 4,1 m e o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) (Figura 12) com variação exponencial para o intervalo de 0,36 m a 4,5 m de profundidade. A escolha destes modelos baseou-se em seus altos valores de correlação (Figuras 11 e 13), além destes constarem em trabalhos anteriores (PHILPOT, 1989; McFEETERS, 1996; TEDESCO, 2003).

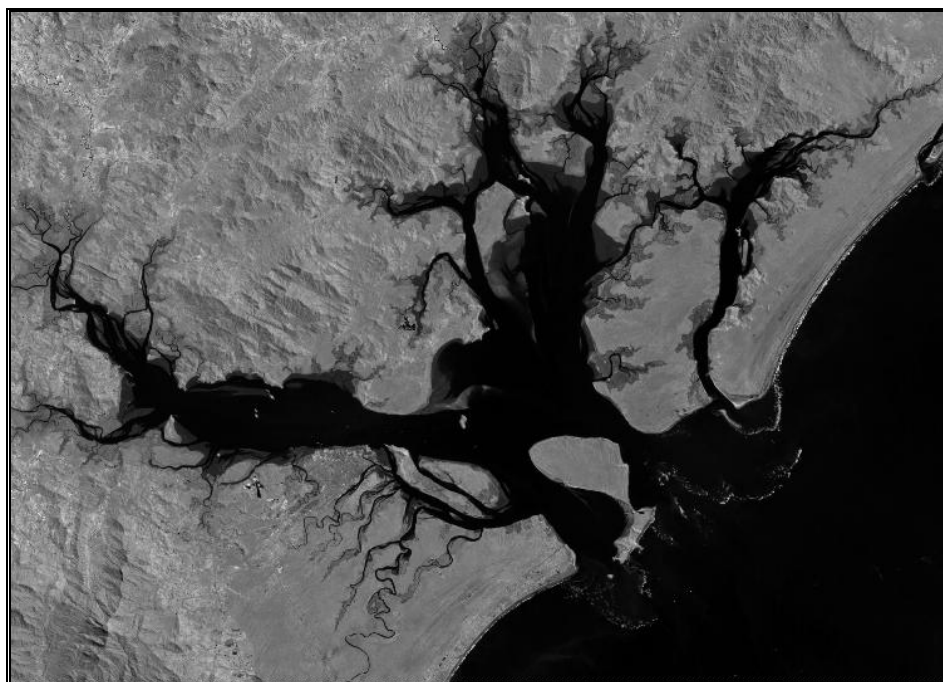


Figura 10 – Imagem do Complexo Estuarino de Paranaguá utilizando a radiância da banda 4.

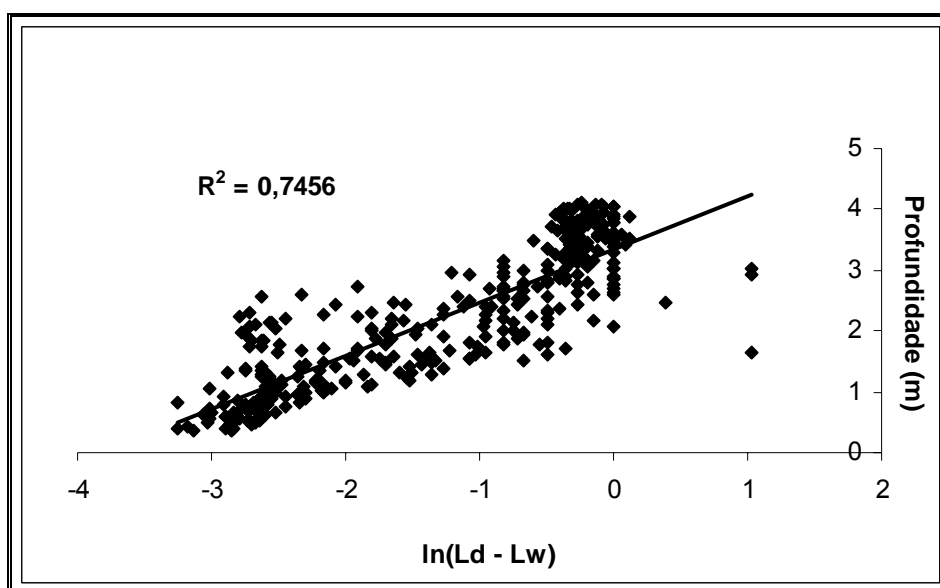


Figura 11 – Comportamento de $\ln(Ld - Lw)$ em relação às profundidades entre 0,36 m e 4,10 m.



Figura 12 – Imagem do Complexo Estuarino de Paranaguá utilizando o Índice de Diferença Normalizado da Água (NDWI).

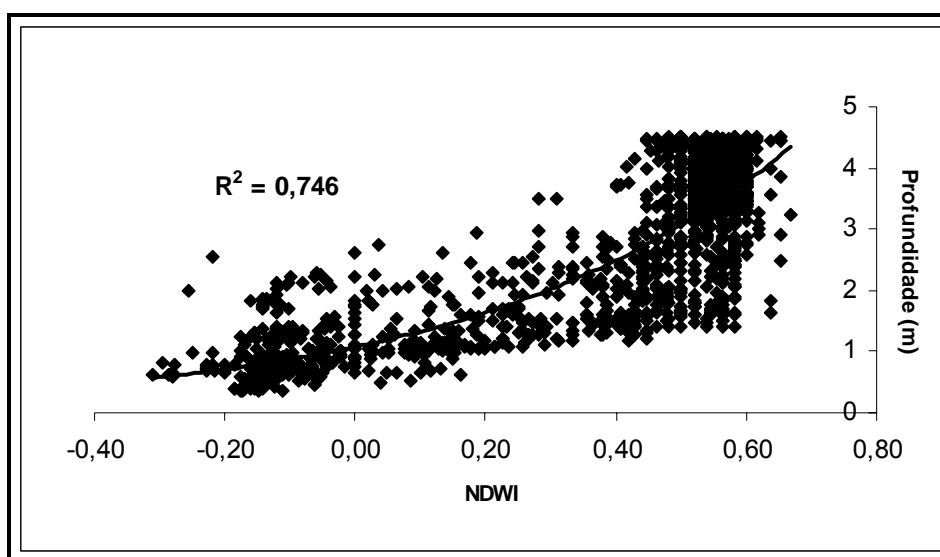


Figura 13 - Comportamento dos valores digitais do NDWI em relação às profundidades entre 0,36 m a 4,5 m.

O comportamento dos valores dos demais modelos testados encontram-se em anexo.

6.1 Método utilizando a radiância da banda 4

A equação obtida a partir das radiâncias correspondentes à banda 4, canal do infravermelho próximo no Landsat 7 – ETM+, foi aplicada no programa de processamento digital de imagens, ER – Mapper e o modelo construído foi aplicado tanto para a região de batimetria conhecida, em frente ao porto de Paranaguá, como para o setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá (Figuras 14 e 15).

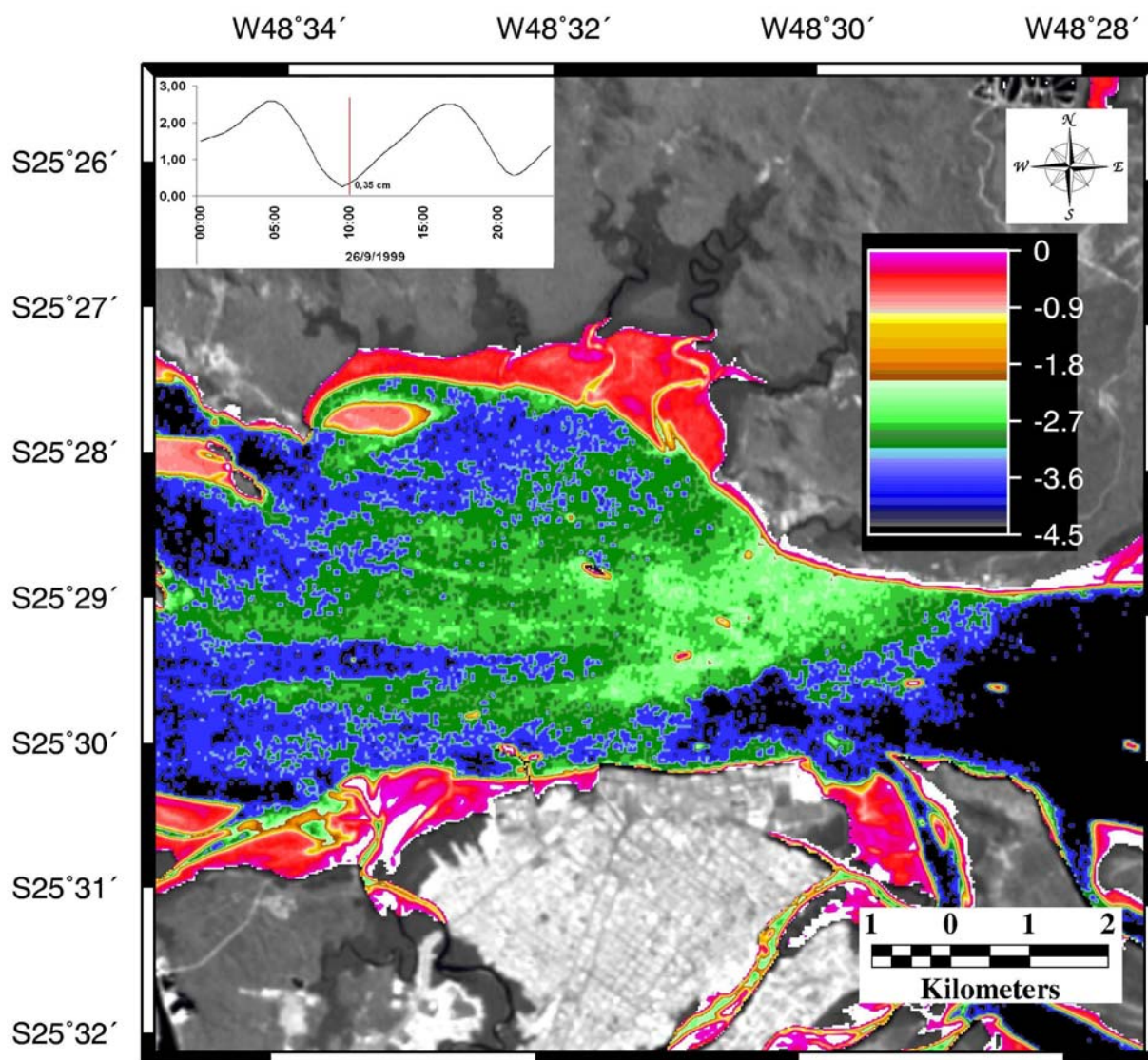


Figura 14 – Batimetria estimada para a área em frente ao Porto de Paranaguá a partir do método simples de extração de profundidades utilizando a radiância da banda 4. As profundidades estão em metros. O gráfico mostra a altura da maré na hora da aquisição da imagem pelo satélite Landsat 7 – ETM+.

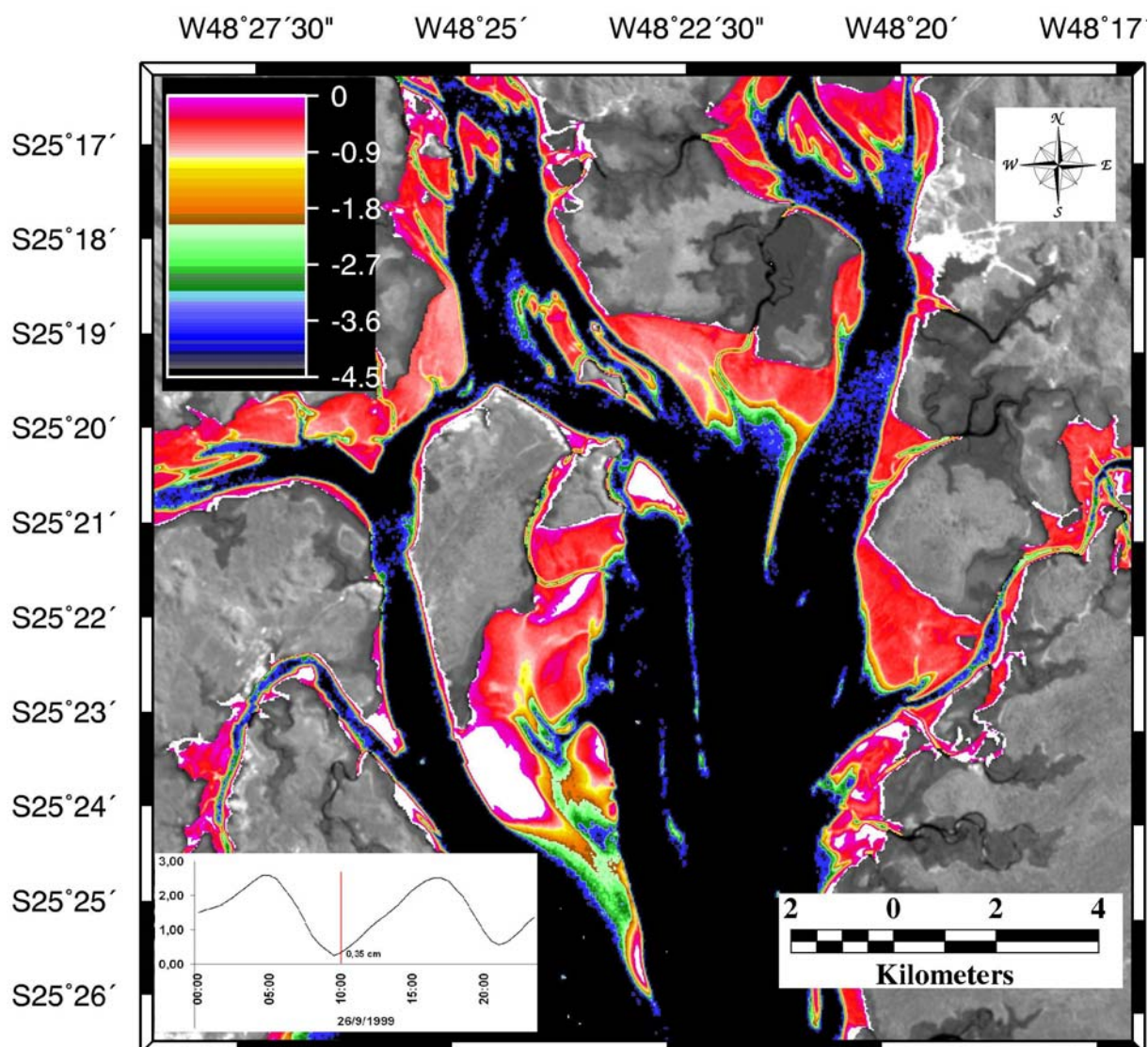


Figura 15 – Batimetria estimada para o setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá a partir do método simples de extração de profundidades utilizando a radiância da banda 4. As profundidades estão em metros. O gráfico mostra a altura da maré na hora da aquisição da imagem pelo satélite Landsat 7 – ETM+.

Para avaliar o comportamento da resposta à medida que a profundidade aumenta, foi construído um gráfico com as profundidades reais no eixo da variável independente e as diferenças entre as profundidades reais e as geradas pelo modelo proposto como variável dependente (Figura 16).

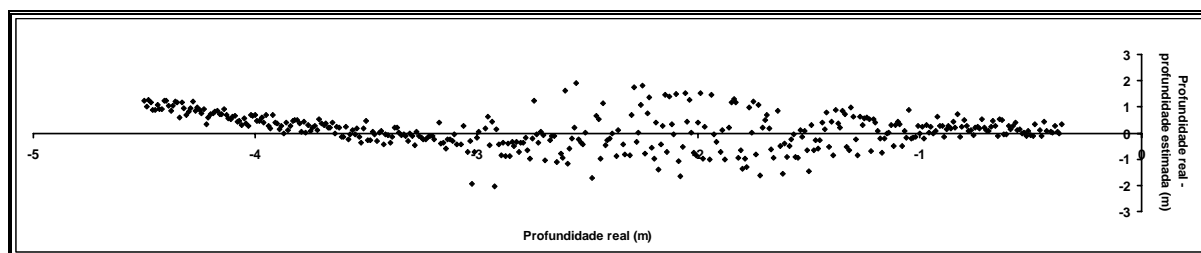


Figura 16 – Padrão dos erros para modelo simples de Philpot com radiâncias da banda 4 com intervalo de profundidades entre 0,36 e 4,1 m.

Na análise do padrão de erros observa-se que no primeiro metro a diferença entre a profundidade verdadeira e a estimada pelo método oscila pouco, variando menos que um metro. Também nesse intervalo, a profundidade real é maior que a estimada pelo modelo. Isto pode ser consequência da pouca profundidade, sendo a resposta espectral unicamente do fundo, com pouca interferência da coluna d'água.

Do primeiro até os três metros de profundidade os erros oscilam em até cerca de 2 m. Nesse intervalo, a resposta recebida pelo sensor está tendo influência significativa tanto da coluna d'água quanto do fundo, resultando nesta maior variabilidade. Já a partir dos 3,5 m de profundidade a influência do fundo no sinal perde intensidade, e a influência da coluna d'água no sinal passa a ser dominante. O erro vai aumentando à medida que a profundidade cresce pois a tendência do modelo é linearizar a partir do momento em que a coluna d'água vai deixando de ser ópticamente rasa.

Para observar onde se encontravam as maiores discrepâncias entre as profundidades verdadeiras e o modelo construído, foram calculadas as diferenças entre a profundidade verdadeira e a estimada para todos os pontos da área mais rasa sondada em 1998 pela DHN, em frente ao porto de Paranaguá (Figura 17). Como o método de radiância

da banda 4 é válido apenas para profundidade até 4,1 m, as áreas com profundidades maiores foram as que obtiveram as maiores diferenças. Os erros superiores a 18 m devem-se a regiões onde o registro da DHN mostrou altas profundidades, embora na carta náutica nº 1824, correspondente à baía de Paranaguá, a região não ultrapassa os 15 m de profundidade.

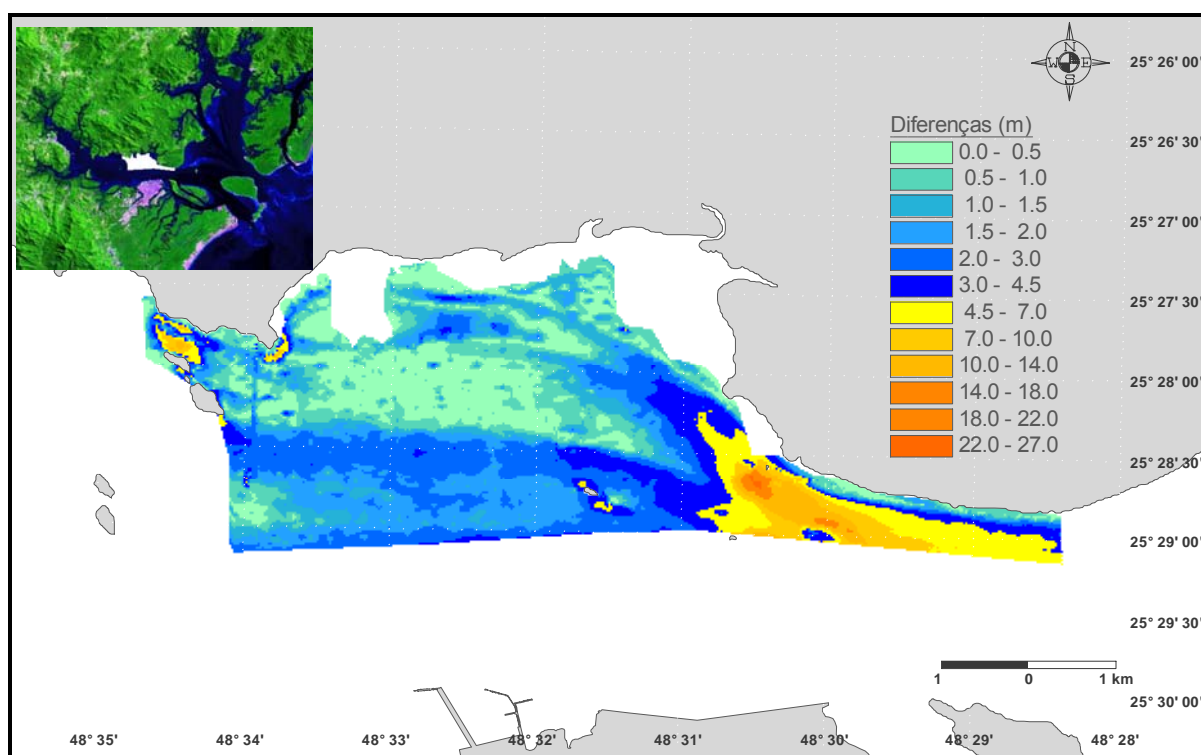


Figura 17 – Mapa das diferenças entre as profundidades reais e as profundidades estimadas pelo modelo simples de extração de batimetria.

6.2 Método utilizando Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI

A equação foi obtida a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI, que é baseado nas bandas 2, correspondente ao canal verde do Landsat 7 – ETM+, e 4, o canal do infra-vermelho próximo do satélite (ver eq. (8)). O método foi aplicado no programa de processamento digital de imagens, ER – Mapper e o modelo construído foi aplicado tanto

na região de batimetria conhecida, em frente ao porto de Paranaguá, como no setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá (Figuras 18 e 19).

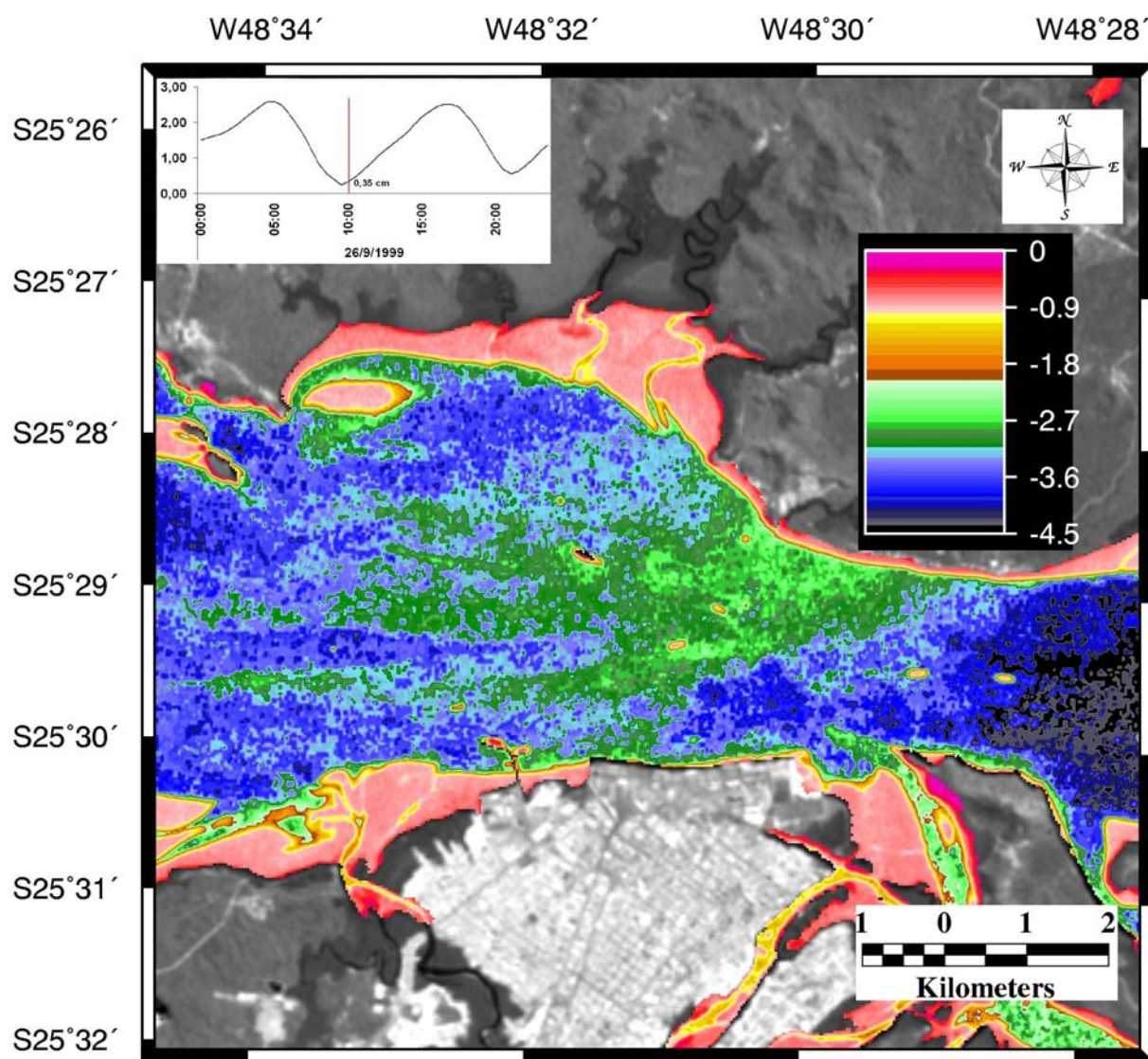


Figura 18 – Batimetria estimada para a área em frente ao Porto de Paranaguá a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI. As profundidades estão em metros. O gráfico mostra a altura da maré na hora da aquisição da imagem pelo satélite Landsat 7 – ETM+.

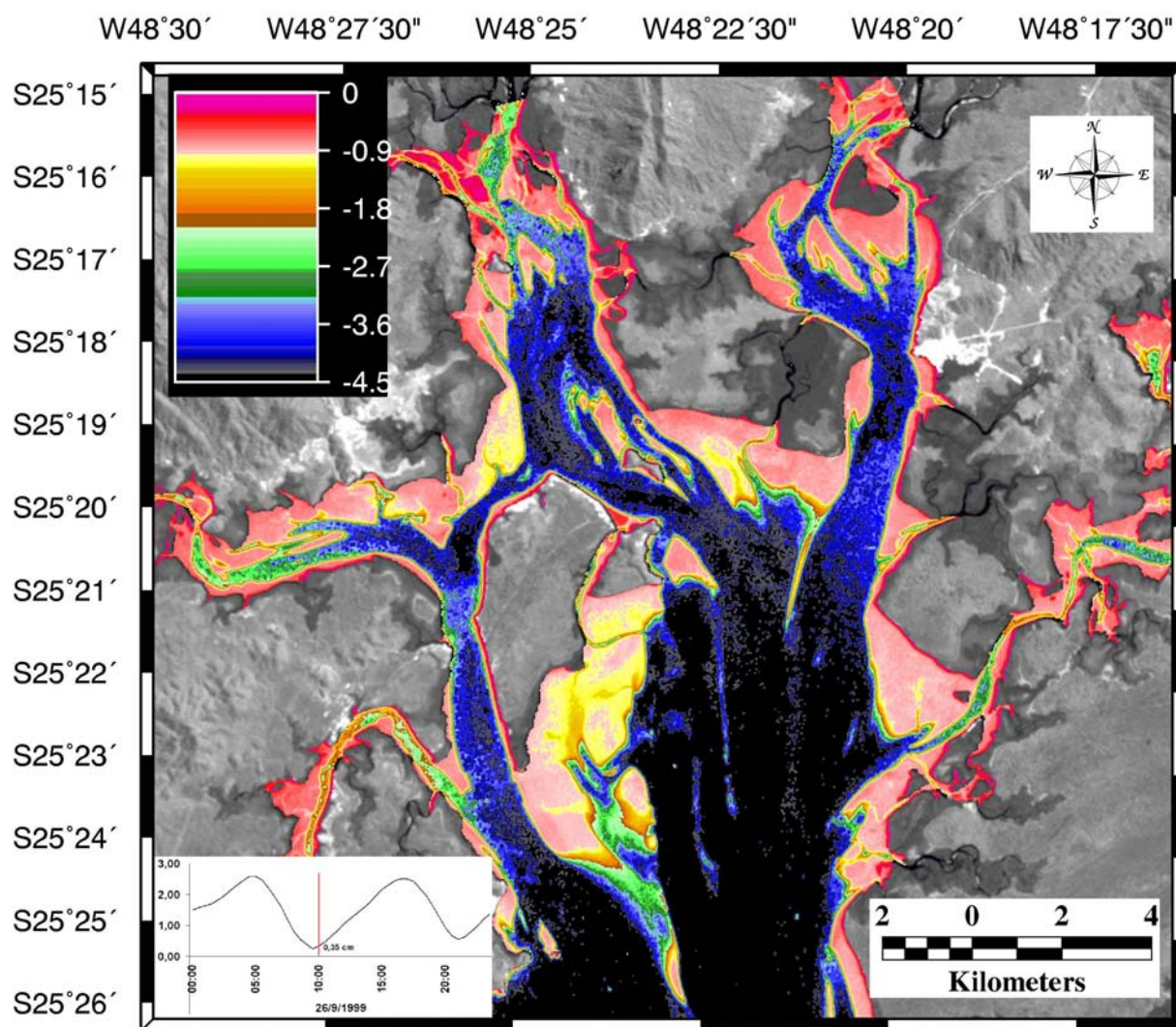


Figura 19 – Batimetria estimada para o setor norte do Complexo Estuarino de Paranaguá a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água – NDWI. As profundidades estão em metros. O gráfico mostra a altura da maré na hora da aquisição da imagem pelo satélite Landsat 7 – ETM+.

Um gráfico com as profundidades reais no eixo da variável independente e as diferenças entre as profundidades reais e as dadas pelo modelo proposto como variável dependente foi plotado para observar o comportamento da resposta (Figura 20).

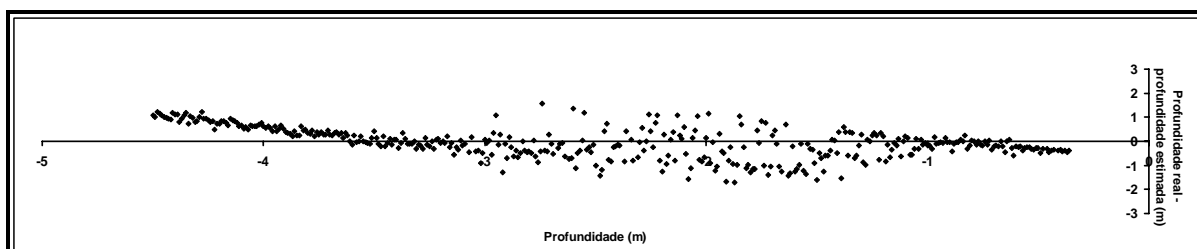


Figura 20 – Padrão dos erros para modelo do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) com intervalo de profundidades entre 0,36 e 4,5 m.

No primeiro metro a diferença entre a profundidade verdadeira e a estimada é menor que um metro, isso porque no Índice de Diferença Normalizada da Água a banda 2, correspondente ao canal verde, é considerada. Esse canal compreende os comprimentos de onda que vão de 0,52 a 0,6 μm , sendo que nessa faixa a água é razoavelmente transparente. No NDWI, ao contrário do primeiro método testado, a profundidade real é menor que a estimada.

Assim como no modelo simples de extração de batimetria utilizado, do primeiro até os 3 m de profundidade os erros aumentam em até 2 m. Nesse intervalo, a resposta recebida pelo sensor tem a influência tanto da coluna d'água quanto do fundo. A partir dos 3 m de profundidade o sinal não reflete mais influência do fundo, mas apenas da coluna d'água. O erro vai aumentando à medida que a profundidade cresce pois a tendência do modelo é linearizar a partir do momento em que a coluna d'água vai deixando de ser opticamente rasa.

Para identificar e analisar as regiões com as maiores diferenças entre as profundidades estimadas pelos modelos selecionados e a profundidade real da área, foram calculadas as diferenças entre a profundidade verdadeira e a estimada pelo método do NDWI utilizado para todos os pontos da área mais rasa sondada em 1998 pela DHN, em

frente ao porto de Paranaguá (Figura 21). Como o método é válido apenas para profundidade de até 4,5 m, as áreas com profundidades maiores foram as que obtiveram as maiores diferenças. Os erros superiores a 18 m ocorrem em regiões onde o registro da DHN mostra altas profundidades, embora na carta náutica nº 1824 a região não ultrapasse os 15 m de profundidade.

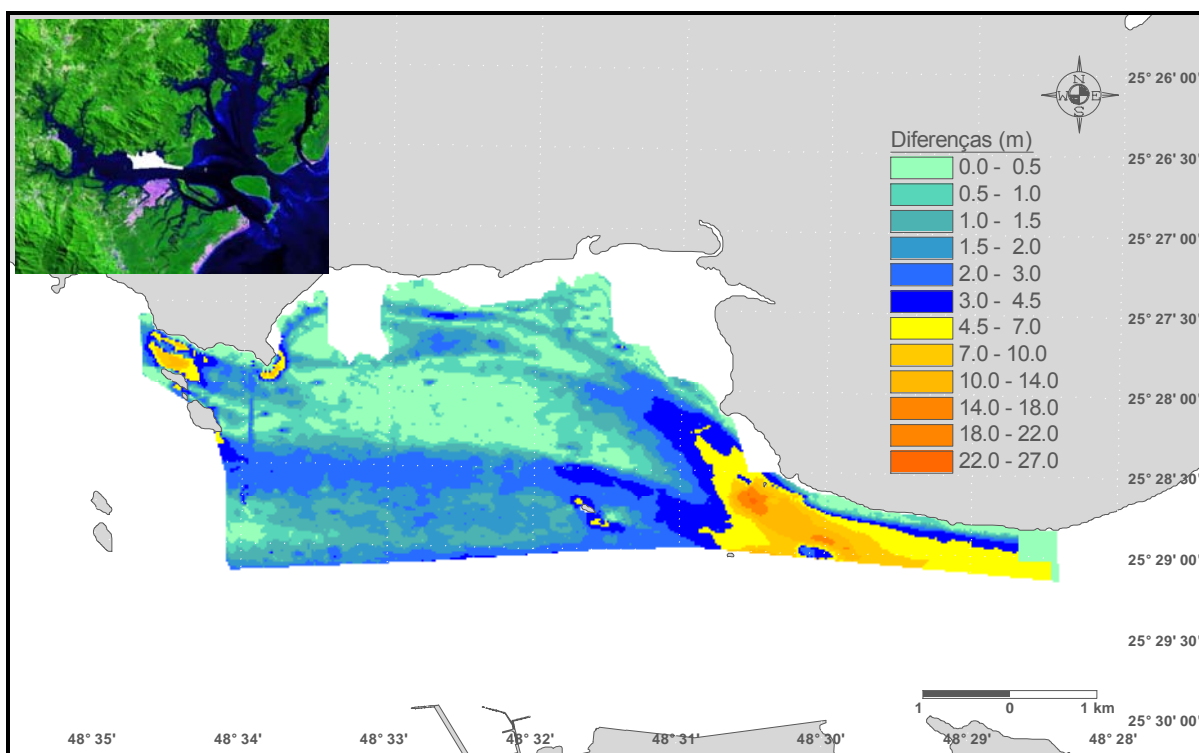


Figura 21 – Mapa das diferenças entre as profundidades reais e as profundidades estimadas pelo Índice de Diferença Normalizada da Água.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Técnicas de sensoriamento remoto têm sido empregadas por muitos investigadores para obter informações sobre os ambientes marinhos e costeiros. O conhecimento e o entendimento das heterogeneidades temporais e espaciais de estuários são de suma importância para o seu manejo. Distinguir estas diferentes variações causadas pelas alterações na profundidade da água, pelo tipo de fundo e pelo espalhamento e absorção na coluna d'água é o grande desafio quando se trata de extração de batimetria por imagens de satélite. O ideal é que essas influências possam ser identificadas e quantificadas e desta forma, consideradas no modelo.

Embora estas variáveis tenham importância relativamente significativa no interior do Complexo Estuarino de Paranaguá, as variações mais relevantes são as causadas por alterações devido à profundidade, tipo de fundo e material em suspensão na água. Este último foi desconsiderado para a imagem Landsat utilizada neste estudo, pois na data de aquisição a estação era inverno, uma época de chuva escassa e com água bastante limpa. Apesar disso, as correntes de maré são potenciais causadores de processos de ressuspensão de sedimentos de fundo, causando aumento de materiais em suspensão na coluna d'água.

Quando se trata de métodos de extração de batimetria de única banda, a radiância da banda 4 é geralmente mais utilizada para delinear as fronteiras de corpos aquosos pois esse comprimento de onda é fortemente refletido por vegetação terrestre e solo seco e fortemente absorvido pela água, o que faz com que a batimetria realizada com essa banda seja eficiente apenas nos primeiros metros. Normalmente, os canais 2 e 3, correspondentes dos comprimentos de onda visível verde e vermelho, respectivamente, e modelos que trabalham com ambas as bandas são os mais utilizados para extração de batimetria a partir de imagens de satélite. Nesse estudo, foi utilizado o canal infra-vermelho próximo devido a

boa correlação entre as profundidades da sondagem e os níveis de cinza desta banda. Acredita-se que essa melhor correlação deva-se também pela condição de maré baixa no momento de aquisição da imagem, aumentando consideravelmente as áreas de baixa profundidade.

Já métodos de razão de bandas, como o Índice de Diferença Normalizada da Água, tomam como vantagem as diferenças entre as reflectâncias de diferentes comprimentos de ondas de uma dada superfície. A resposta da banda do infra-vermelho próximo é subtraída pela resposta de uma banda visível como a verde (banda 2) para que as feições de solo seco e vegetação terrestre (que são bastante destacadas no infra-vermelho próximo) sejam minimizadas e que a presença de feições de água (tipicamente baixas no infra-vermelho próximo) seja realçada.

Comparando-se os mapas e as diferenças entre as profundidades reais e as profundidades geradas por ambos os métodos (tabela 5), constata-se que o Índice de Diferença Normalizada da Água apresenta erros menores que o modelo simples de radiância. Isso se deve ao uso dos níveis de cinza do canal verde, o qual corresponde a comprimentos de onda que penetram mais na coluna d'água.

Profundidade (m)	NDWI (cm)	Radiância banda 4 (cm)
0,36 - 1 m	0,28	0,36
1 - 2 m	0,81	0,93
2 - 3 m	0,77	0,88
3 - 4 m	0,41	0,47
4 - 4,5m	0,94	0,98

Tabela 5 – Erros médios para os métodos de Índice de Diferença Normalizada da Água e de radiância da banda 4.

O tipo de sedimento do fundo é um parâmetro considerado como constante (homogêneo) no modelo. Contudo, sabe-se que diferentes composições de fundo vão apresentar respostas espectrais diferenciadas. A composição do fundo na área utilizada como base, em frente ao porto de Paranaguá, consiste basicamente de silte médio

enquanto o setor norte do CEP é composto por areia muito fina em sua maioria (Figura 7). Esta variação na composição do fundo certamente é um aspecto que contribui na variabilidade dos resultados e que necessita ser estudado com maior detalhamento.

Uma parte da carta batimétrica de número 1820 correspondente a Baía das Laranjeiras (Norte do Complexo) foi digitalizada num scanner comum e foram realçados os baixios e isóbatas. A imagem então foi comparada com o mapa do mesmo trecho gerado pelo método do Índice de Diferença Normalizada da Água e, embora constadas apenas poucas alterações suaves nas feições, nota-se que o mapa gerado pode contribuir com informações que faltam para a carta como as profundidades nos baixios e nos sub-estuários de Itaqui e Benito.

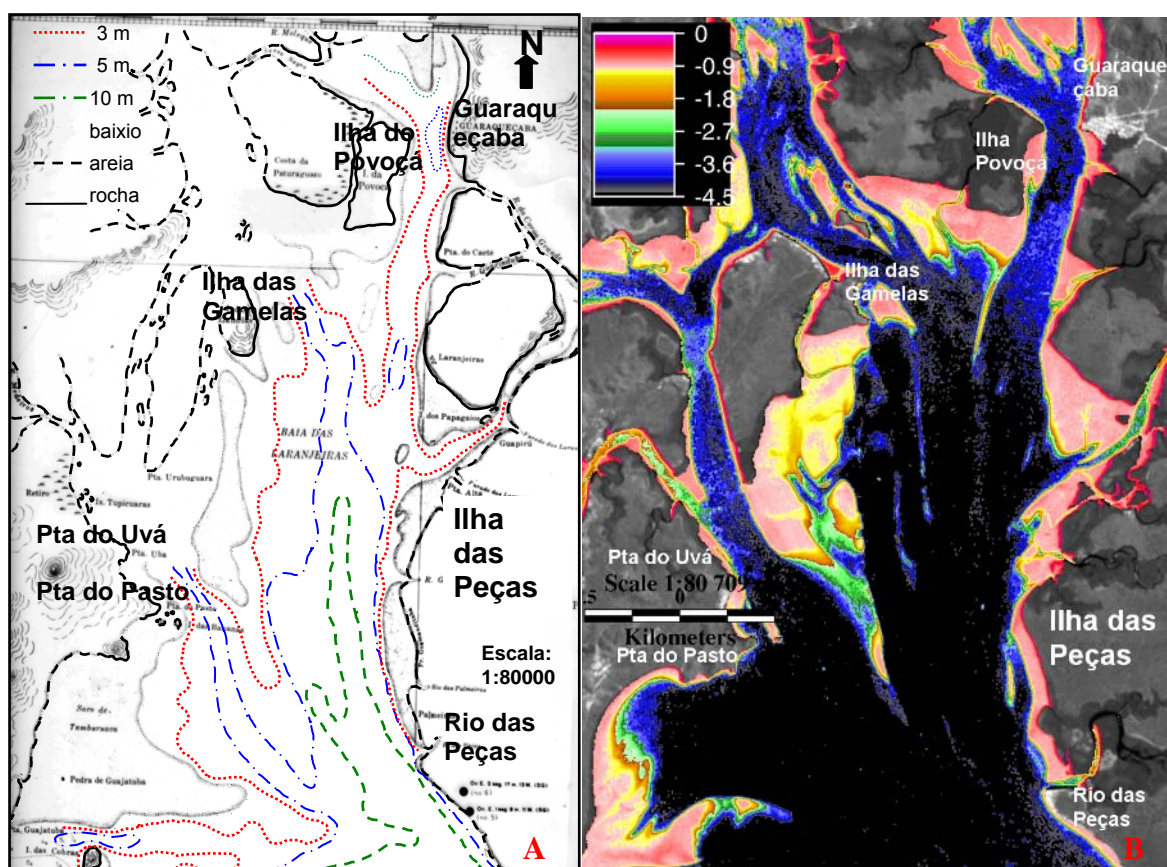


Figura 22 – A) Parte da carta batimétrica nº 1820, correspondente a um trecho da Baía das Laranjeiras com escala 1: 80.000 com compilação de levantamentos efetuados até 1945 (adaptada pela autora para facilitar visualização) e B) Mapa batimétrico obtido através do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) para a data de 26 de setembro de 1999.

A aplicação deste método, de fácil execução, pode ser de grande valia para regiões onde não existam dados batimétricos ou estes estejam muito desatualizados, como locais onde ocorrem variações morfológicas subaquáticas. Os mapas resultantes são bastante fiéis dentro do range de 0,36 m a 4,5 m de profundidade, levando-se em conta que aproximadamente 75% da área do CEP apresentam profundidade inferior a 5 m. Dados de sensoriamento remoto podem prover uma contribuição valorosa na batimetria. Entretanto, as condições ambientais podem ter uma maior influência na acurácia da técnica e necessitam ser consideradas quando da aplicação de modelos.

O presente estudo foi conduzido com a intenção de apresentar um mapa batimétrico das regiões rasas do norte do Complexo Estuarino de Paranaguá. Tal mapa, mesmo sem a acurácia similar as das cartas náuticas, será de utilidade tanto para o planejamento de estudos e para a modelagem ambiental, quanto para a segurança da navegação de embarcações de pequeno porte. A carta batimétrica que compreende a baía das Laranjeiras (Figura 22 - A) mostra valores de profundidade medidos décadas atrás. Embora estes dados tenham caráter científico podem ser adaptados para os padrões internacionais de acordo com as normas da DHN e, assim, completar as informações ausentes da carta.

GLOSSÁRIO

Assinatura Espectral Comportamento espectral das diversas substâncias utilizado no sensoriamento remoto para distinguir diversos materiais entre si.

Geoprocessamento Conjunto de tecnologias voltadas à coleta e tratamento de informações espaciais para um objetivo específico. As atividades envolvendo o geoprocessamento são executadas por sistemas específicos mais comumente chamados de Sistemas de Informação Geográfica.

Radiância Fluxo de energia eletromagnética radiante que provém de uma fonte, numa determinada direção, por unidade de área. A quantificação da radiância contínua de uma cena é representada pelos níveis de cinza.

Reflectância Razão entre o fluxo de energia eletromagnética refletido e o fluxo de energia eletromagnética incidente numa superfície.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, K.; MATJAFRI, M. Z. e DIN, Z. B. **Contribution form Remote Sensing in updating bathymetric chart.** Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ps3/ps311pf.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2004.

ACCIOLY, L. J. De O.; COSTA, T. C. e C. da; OLIVEIRA, M. A. J. de; SILVA, F. H. B. B. da; BURGOS, N. **O papel do Sensoriamento Remoto na avaliação e no monitoramento dos processos de desertificação do semi-árido brasileiro.** Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/download/pa_ma_01.PDF>. Acesso em: 03 maio 2004.

ANGULO, R. J. Feições deposicionais associadas às desembocaduras dos complexos estuarinos da costa paranaense. **Congresso da Associação Brasileira do Quaternário**, 5. Niterói. 1995. p. 58-64

BABAN, S. M. J. Environmental Monitoring of Estuaries; Estimating and Mapping Various Environmental Indicators in Breydon Water Estuary, U. K., Using Landsat TM Imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 44. 1997. p. 589-598.

CABRAL, A. P.; VIANNA, M. L. Extração da Batimetria através de dados TM - LANDSAT. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Vol IV, 1993, p. 94-104.

CÂMARA, G. E MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento para Projetos Ambientais. **Tutorial**. São José dos Campos: INPE. 1996. 142 pp.

CROSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1993. 170 pp.

DHN. 2004. **Informações sobre dados hidrográficos**. Mensagem recebida por <licakrug@ufpr.br> em: 09 ago. 2004.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97pp.

GFM. **Home page do Grupo da Física Marinha** - Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://www.cem.ufpr.br/fisica.htm>>. Acesso em: 19 jul. 2004.

IBGE, 2004. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Cidades@**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 jul. 2004.

KIRK, J. T. O. **Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**. Cambridge: Ed. Cambridge University Press, 2ª Edição, 1994. 509 pp.

LYZENGA, D. R. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. **Applied Optics**, Vol. 17, 3, 1978. p. 379-383.

MANTOVANELLI, A. Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1999. 149 pp.

MARONE, E. NOERNBERG, M. A. Coastal meandering currents and estuarine fronts detected by JERS-1 SAR images **XIX International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress**. Archives - CD-ROM, Vol. XXXIII, part B7, 2000, p. 829-835.

MARTINS, M. R., LUZ, V. J. P., SOARES, C. R. Estudo das Variações Espaciais e Temporais da Linha de Costa e da Formação de Bancos de Areia entre Pontal do Sul e Ilha da Galheta, Paranaguá – PR, por meio de Imagens Orbitais. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Vol IV, 1993, p. 170-180.

MARTINS, M. R. Estudos da massa d'água superficial das Baías de Paranaguá e Antonina PR, utilizando Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1994. 156 pp.

McFEETERS, S. K. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features". **Int. Journal of Remote Sensing**, 17 (7). 1996 p. 1425-1432.

NASA, Landsat 7 – ETM+: **Science data users handbook**. Disponível em: <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/FAS/handbook/handbook_toc.html>. Acesso em: 03 maio 2004.

NOERNBERG, M.A. Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: um estudo a partir de dados in situ e Landsat-TM. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2001. 179 pp.

NOERNBERG, M. A.; LAUTERT, L. F. C.; ARAÚJO, A. D.; MARONE, E.; ANGELOTTI, R.; NETTO Jr., J. P. B.; KRUG, L. A. Remote Sensing and GIS Integration for Modelling the Paranaguá Estuarine Complex –Brazil. **Journal of Coastal Research**. Special Issue 39. 2004.

NORDMAN, M. E.; WOOD, L.; MICHALEK.; J. L.; CHRISTY, J. J. Water depth extraction from Landsat- 5 imagery. **Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 1990, p. 1129-1139.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992. 308 pp.

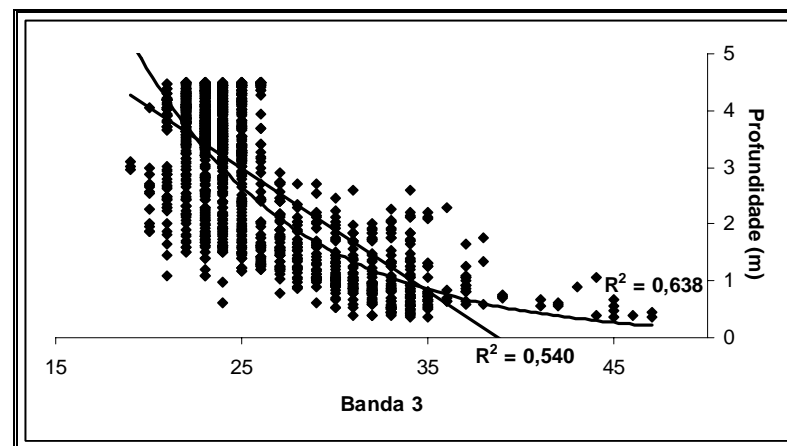
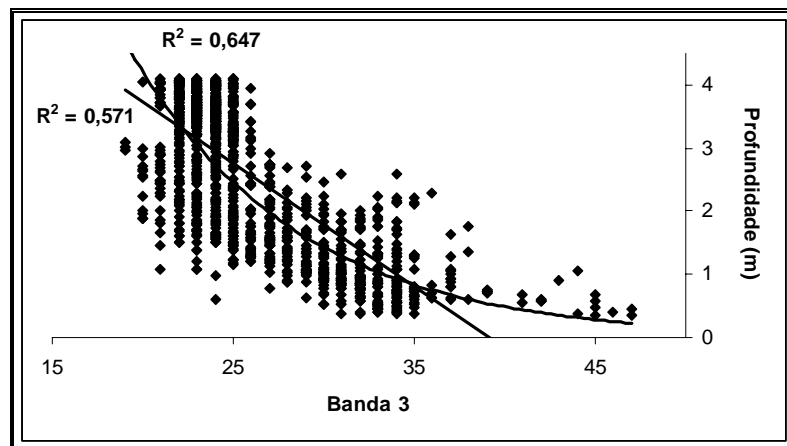
PHILPOT, W. D. Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery. **Applied Optics**, 28 (8). 1989. p. 1569-1578.

SANDIDGE, J. C. AND HOLYER, R. J. Coastal Bathymetry from Hyperspectral Observations of Water Radiance. **Remote Sensing Environment**, 65. 1998. p. 341-352

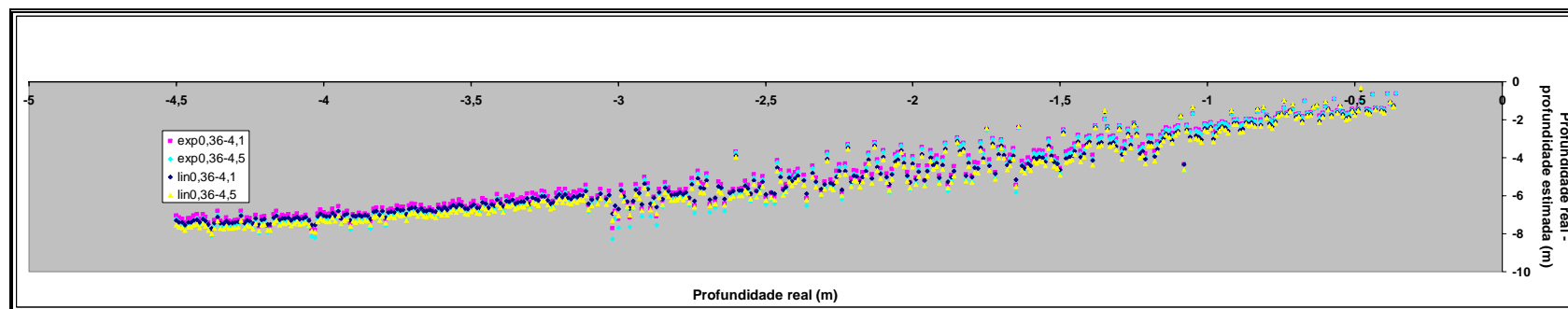
SOARES, C. R. Natureza dos sedimentos do fundo das baías das Laranjeiras e de Guaraqueçaba – Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá (PR). **Dissertação de Mestrado**. Universidade Estadual Paulista, São Paulo. 1990. 187 pp.

TEDESCO, A. Estimativa de Profundidades Utilizando Imagens de Alta Resolução Apoiadas por Dados de Levantamento Batimétrico. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003. 109 pp.

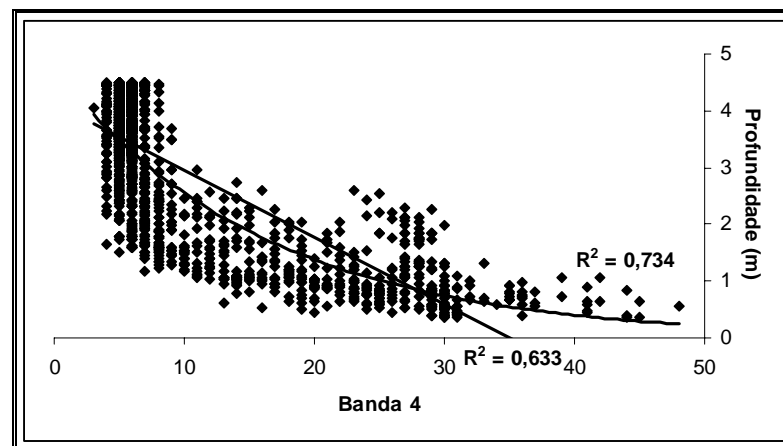
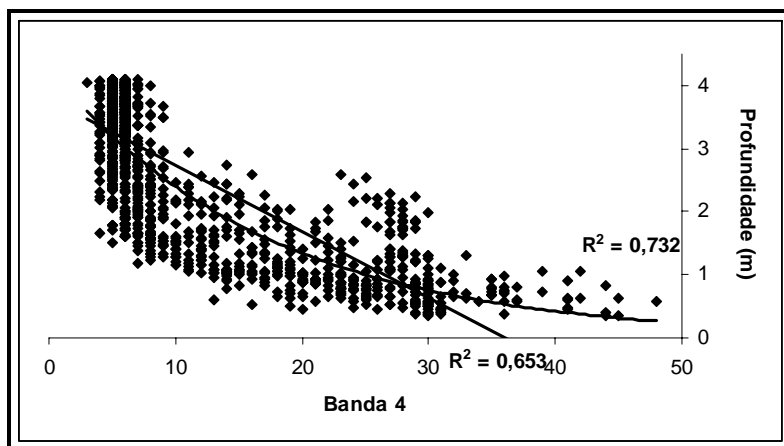
ANEXOS



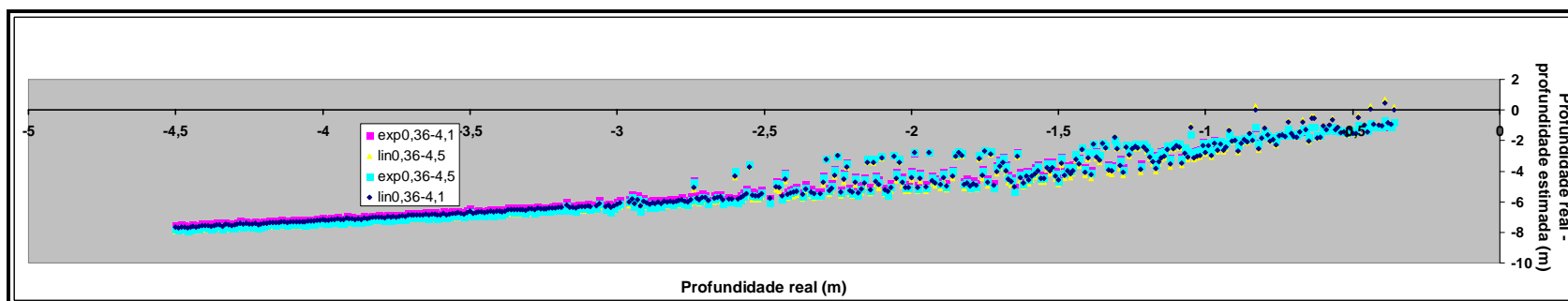
Anexo 1 – Comportamento dos valores digitais da banda 3 em relação às profundidades entre 0,36 m a 4,1 m e 0,36 m a 4,5 m, respectivamente.



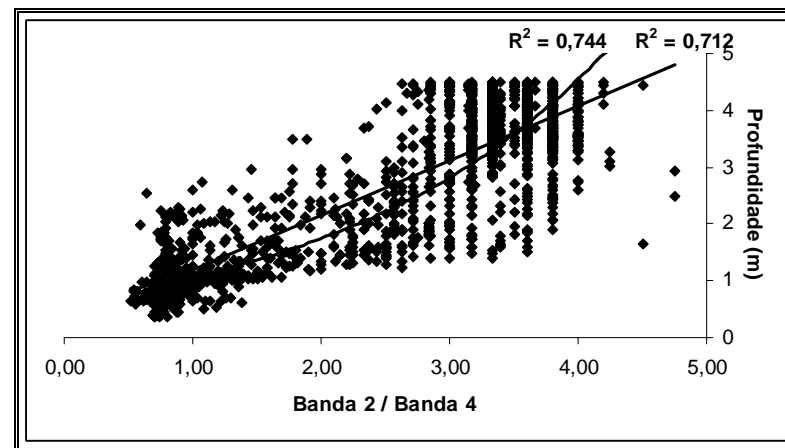
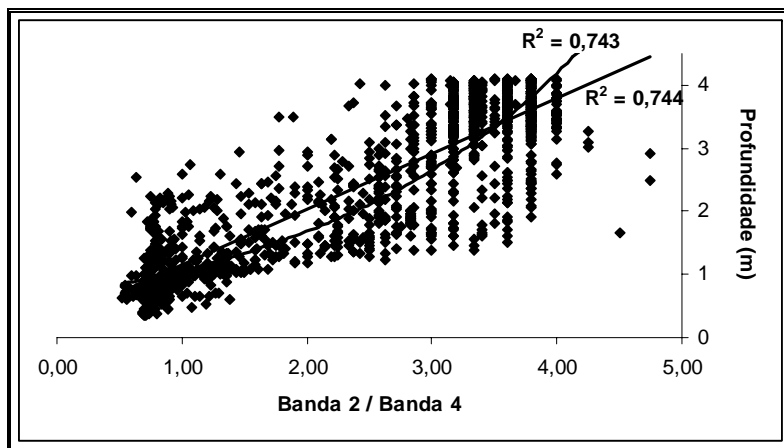
Anexo 2 – Padrão dos erros para o método utilizando os valores digitais da banda 3 para os diferentes intervalos de profundidade e tendências linear (lin) e exponencial (exp).



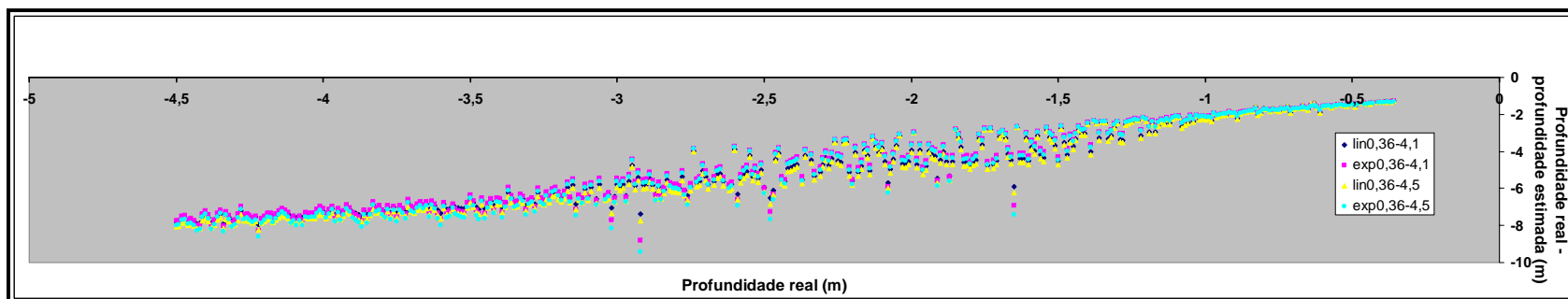
Anexo 3 – Comportamento dos valores digitais da banda 4 em relação às profundidades entre 0,36 m a 4,1 m e 0,36 m a 4,5 m, respectivamente.



Anexo 4 – Padrão dos erros para o método utilizando os valores digitais da banda 4 para os diferentes intervalos de profundidade e tendências linear (lin) e exponencial (exp).



Anexo 5 – Comportamento dos valores digitais da razão entre as bandas 2 e 4 em relação às profundidades entre 0,36 m a 4,1 m e 0,36 m a 4,5 m, respectivamente.



Anexo 6 – Padrão dos erros para o método utilizando os valores digitais resultantes da razão entre as bandas 2 e 4 para os diferentes intervalos de profundidade e tendências linear (lin) e exponencial (exp).

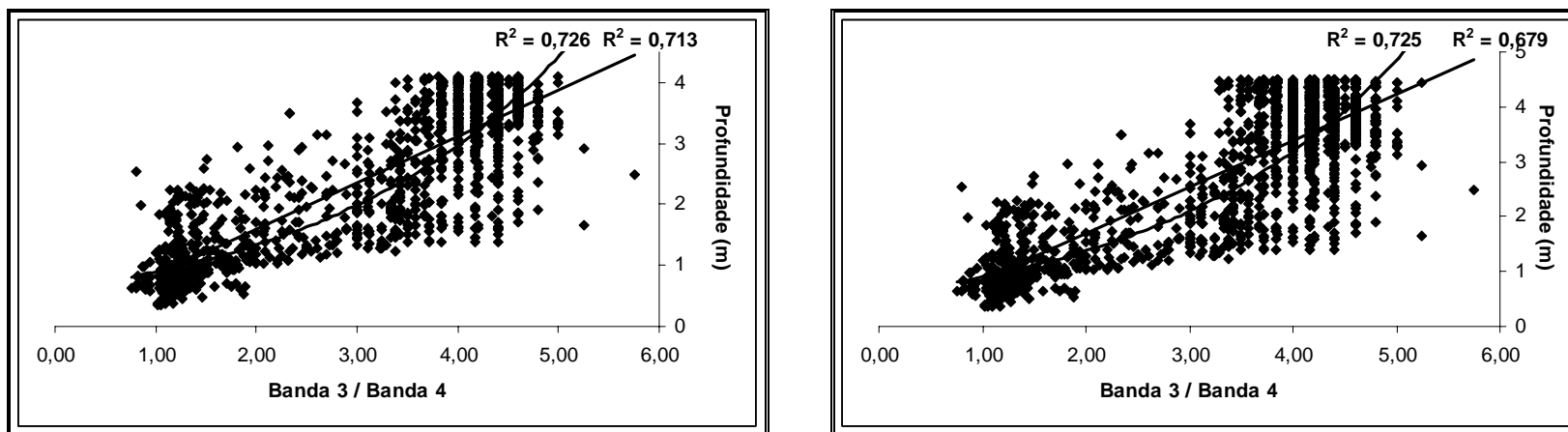


Figura 13 - Comportamento dos valores digitais da razão entre as bandas 3 e 4 em relação às profundidades entre 0,36 m a 4,1 m e 0,36 m a 4,5 m, respectivamente.

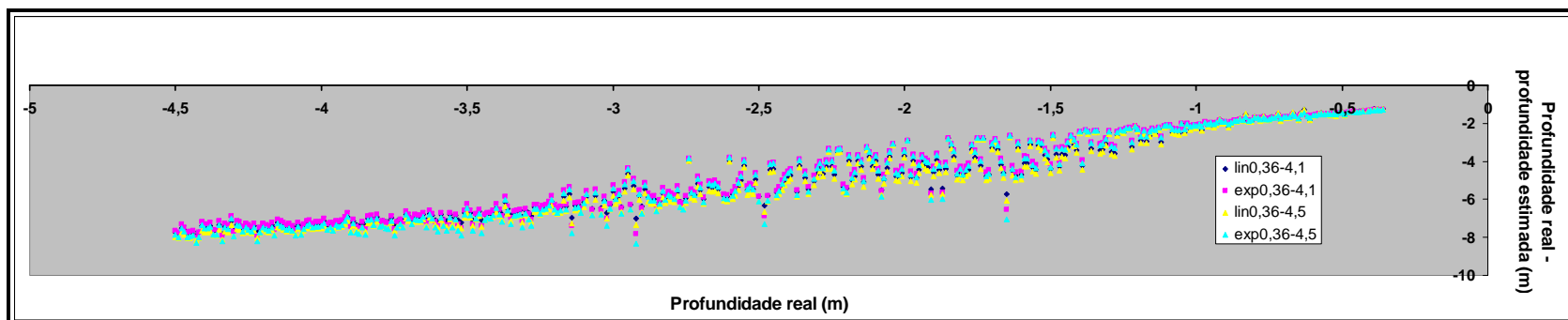


Figura – Padrão dos erros para o método utilizando os valores digitais resultantes da razão entre as bandas 3 e 4 para os diferentes intervalos de profundidade e tendências linear (lin) e exponencial (exp).